INVESTIGACION y CIENCIA

ILUSIONES MUSICALES: SUTILEZAS DE LA AUDICION

CODIGOS SECRETOS PARA LA INTIMIDAD ELECTRONICA

FLORA AMERICANA EN EUROPA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



EL INQUIETO KILAUEA

OCTUBRE 1992
600 PTAS.



Octubre de 1992 Número 193



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Nemesio M. Pérez Rodríguez: *Dinámica del volcán Kilauea*; Esteban Santiago: *Endotoxinas bacterianas*; Ramón Pascual: *Cosmología: teoría y observaciones*; Joandomènec Ros: *Ratas topo desnudas*; Luis Bou: *La evolución cobra vida, Paradojas de la tonalidad musical, Protección de la intimidad en la era electrónica* y *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace...* ; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*

Ciencia y sociedad:

Ramón Pascual, J. Cebrián y C. Duarte, Joandomènec Ros, Josep E. Llebot y Ernesto Sánchez-Herrero y Ginés Morata

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Antonio Fernández-Rañada, Ramón Margalef y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Lee Allen Thomas/Doug Peebles Photography
8	Guilbert Gates
9	Landsat/EROS Data Center
10-11	Guilbert Gates
12	J. D. Griggs, U.S. Geological Survey (*arriba*), Guilbert Gates (*abajo*)
13	J. D. Griggs (*izquierda*), M. Timothy O'Keffer/Bruce Coleman, Inc. (*derecha*)
17	Helmut Brade
18	Ian Worpole (*arriba*), Günter Schmidt, Borstel Research Institute (*abajo*)
19	Ian Worpole (*izquierda*), Manfred Kastowsky and Harald Labischinski (*derecha*)
20-23	Ian Worpole
26-27	Jason Goltz
28	Cortesía de Ralph A. Alpher
29	Johnny Johnson
30	Archivo Bettmann
31	Johnny Johnson
44-45	Raymond A. Mendez/Work As Play
46-47	Patricia J. Wyne
48	Raymond A. Mendez/Work As Play
49	Jennifer U. M. Jarvis
50	Raymond A. Mendez
52-59	Jason Goltz
61	©1960 M. C. Escher/Cordon Art
62	Edward Bell y Antonio Aragón
63-64	Edward Bell
67-70	Jared Schneidman
71	Marc Skinner
75-80	Le Scienze
87-89	Documentos Pour La Science



LA FOTOGRAFIA DE LA PORTADA capta una emisión lávica que brota del rift este del Kilauea. La actividad eruptiva actual del volcán, en su décimo año consecutivo, presta un servicio a la comunidad científica que busca entender y predecir el comienzo de la actividad eruptiva de los volcanes [véase "Dinámica del volcán Kilauea" por John J. Dvorak, Carl Johnson y Robert I. Tilling, en este mismo número]. La actividad incesante del volcán no nos deja olvidar tampoco las potentes fuerzas que esconde el interior de la Tierra. (Fotografía: Lee Allen Thomas/Doug Peebles Photography)

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Todo sobre Eva

Rezuman arrogancia las partes enfrentadas en el debate sobre los orígenes modernos de los seres humanos ["Origen africano reciente de los humanos", de Allan C. Wilson y Rebecca L. Cann; y "Evolución multiregional de los humanos", de Alan G. Thorne y Milford H. Wolpoff, INVESTIGACION Y CIENCIA, junio], aunque se palpa más en las declaraciones de los investigadores del ADN mitocondrial que en las de los paleoantropólogos.

Recientemente, utilizando exactamente el mismo material de ADN mitocondrial de que disponían Wilson y Cann, Alan R. Templeton, de la Universidad de Washington, ha demostrado que existen 100 genealogías posibles de parsimonia mayor que la que estos autores presentaron. S. Blair Hedges, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y otros han corroborado, además, que, estadísticamente hablando, hay 50.000 árboles "mejores" que el que propugnan Wilson y Cann.

La conclusión forzosa es que las pruebas genéticas de que se dispone ni pueden ofrecer una escala temporal para la aparición de la forma humana moderna, ni proporcionar atisbo alguno de que Africa fuera el lugar donde eso aconteció.

C. LORING BRACE
Museo de Antropología
Universidad de Michigan

Los dos artículos que ilustran la controversia existente a propósito de Eva, en su revista de junio, parecen adolecer de defectos de lógica. Cuesta tomarse en serio el cuadro pintado por Thorne y Wolpoff, atufado de excesivo personalismo.

En opinión de Thorne y Wolpoff, habría caracteres que marcarían linajes poblacionales específicos que sobrevivirían a lo largo de cientos de miles de años; ello implicaría que los rasgos en cuestión conferirían grandes ventajas selectivas. Al mismo tiempo, habría suficiente flujo génico que supondría nuevas mutaciones ventajosas para mantener a todas las poblaciones evolucionando hacia el *Homo sapiens* moderno en filas cerradas. En consecuencia, la selección y el flujo génico causarían que las poblaciones humanas se parecieran más estrechamente, en tanto que la selección y la falta de flujo génico las mantendrían diferenciadas; y ese extraño equilibrio persistiría a lo largo de casi un millón de años. No lo creo.

Finalmente, el párrafo con el que se abre el artículo de Thorne y Wolpoff es pura historia recontada en provecho propio. A propósito del estatuto homínido de *Ramapithecus*, escribe Wolpoff: "Los biólogos moleculares terciaron en el debate y apoyaron la posición minoritaria mantenida por uno de nosotros..." Nadie, que yo sepa, atribuye a Wolpoff el mérito de ninguna contribución significativa al tema hasta después de las presentaciones originales que Wilson y yo mismo hicimos en 1966 y 1967.

VINCENT SARICH
Departamento de Antropología
Univ. de California en Berkeley

Réplica de Cann:

Hay que avanzar en el análisis de conjuntos ingentes de datos si queremos ponderar la importancia exacta de ciertos nudos de ramificación en los árboles establecidos mediante el ADN mitocondrial humano. Todos los programas de ordenador se basan en hipótesis sobre la biología de las mitocondrias; pero no todas las conjeturas son válidas para todas las regiones de la molécula.

Los árboles moleculares constituyen solamente una línea de prueba en la hipótesis de los orígenes africanos. No debemos olvidar otro par de datos del mayor interés. En primer lugar, los niveles más elevados de diversidad genética mitocondrial y nuclear para cualquier grupo humano actual se encuentran en poblaciones del Africa subsahariana. La mayoría de los biólogos evolutivos verían en esa observación un sólido respaldo de la idea de nuestro centro de origen en Africa.

En segundo lugar, los fósiles más antiguos de un humano con anatomía del hombre moderno proceden de Africa. Asimismo, las primeras técnicas líticas que aparecieron asociadas con los seres humanos modernos se desenterraron en Africa, no en Asia. Y como dije en un comienzo, no avanzaremos en este campo si no refinamos nuestra evaluación del ADN extraído de muchos fósiles humanos de menos de 200.000 años de antigüedad.

REBECCA L. CANN
Facultad de Medicina
Universidad de Hawai en Manoa

Réplica de Thorne y Wolpoff:

No nos parece que los marcadores de continuidad regional confieran, de suyo, una ventaja selectiva. Antes bien, la gran ventaja selectiva pertenece a las características que cambian en todo el mundo a lo largo de la evolución humana. Hemos buscado marcadores de continuidad que no respondan a una sola selección local, porque son los únicos que pueden resolver el tema del origen y no de la adaptación como una explicación potencial de su persistencia. Los equilibrios entre la selección local (o la deriva genética) y el flujo génico para determinados rasgos crean gradientes espaciales que son sensibles a las magnitudes de cada uno de ellos, pero ninguno puede predominar sobre el otro.

Sarich no ha entendido el sentido de nuestra referencia a *Ramapithecus*: refutar la afirmación que hacen Wilson y Cann de que un "reloj molecular" resolvió en último término la disputa. Las discusiones sobre *Ramapithecus* empezaron con la primera publicación del género en 1934. El debate terminó con la presencia de nuevos restos fósiles, una mejor información geológica y los estudios anatómicos, no por un "reloj".

ALAN G. THORNE
Instituto de Estudios Avanzados
Universidad Nacional de Australia

MILFORD H. WOLPOFF
Departamento de Antropología
Universidad de Michigan

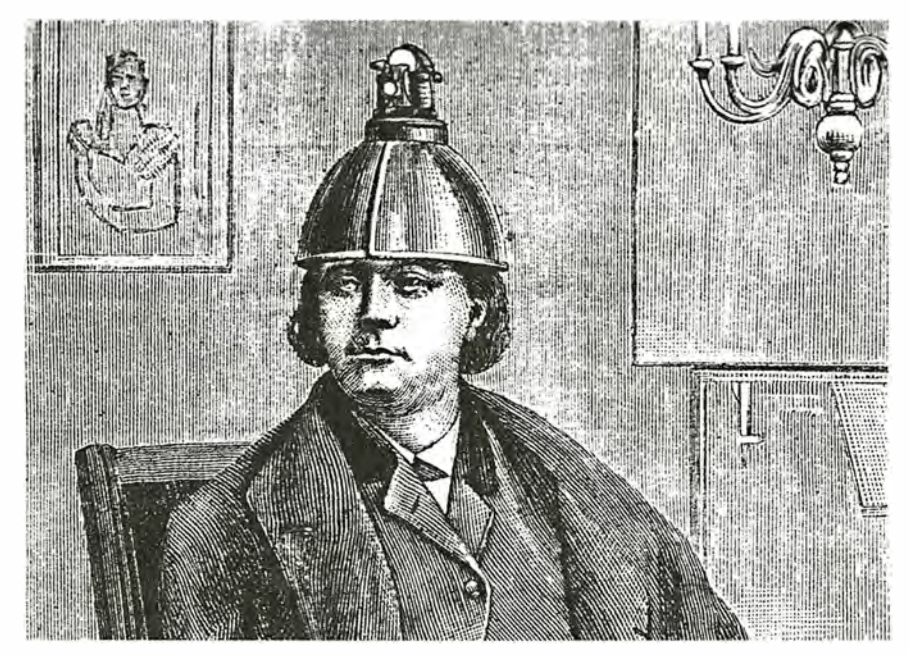
Hace...

... *cincuenta años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según Mr. James F. Lincoln, presidente de Lincoln Electric Company, 'los problemas con que vamos a encontrarnos después de la guerra son dobles. En primer lugar, habrá mucho paro, pues aunque la demanda de bienes sea lo bastante grande para garantizar suficientes puestos de trabajo, llevará tiempo el readaptar la mano de obra a la producción de paz. En segundo lugar, la competencia habrá cambiado debido a la presencia de sociedades financiadas por el gobierno cuyos gastos generales serán menores que las de aquellas que se hayan financiado sus propios crecimientos. Y quedan muchas incógnitas. No sabemos, por ejemplo, qué clase de gobierno tendremos. La historia parece indicarnos que será totalitario. Ningún país en bancarrota escapó jamás al totalitarismo. Quizá todas nuestras previsiones sean en balde porque serán los burócratas quienes nos digan qué hacer y cómo hacerlo.'»

«M. F., una joven de 25 años, había presentado síntomas de esquizofrenia durante un decenio sin que se le diagnosticara claramente hasta abril de 1939. Ni los choques insulínicos ni el metrazol alteraban su estado. El 29 de julio se probó con hipotermia general. Su temperatura se mantuvo a 36,5 grados durante 29 horas y por debajo de 35 grados durante 22 horas, llegando a un mínimo de 28,5 en una ocasión. 'A continuación, regresó a su domicilio', informan los doctores John H. Talbott y Kenneth J. Tillotson, de la Facultad de Medicina de Harvard. En el último informe de seguimiento se evidenciaba su equilibrio y adaptación social.»

«La desintegración de átomos para liberar grandes descargas de energía es un pasatiempo rentable... para los periodistas. Pero no es un capítulo que goce de mucho cartel en los laboratorios de física. Las sustancias radiactivas, de las que en la Tierra hay sólo cantidades ínfimas, se desintegran y liberan lentamente grandes cantidades de energía. Si, por ejemplo, el radio abundase tanto como el cobre serían viables las calderas atómicas cuyo combustible fuese radio, pero ocurre que de éste no hay tantas reservas. En lo que respecta a las desintegraciones artificiales, hasta ahora el veredicto parece ser desfavorable, al no conseguirse en el proceso un saldo energético positivo. Al proceso hay que alimentarlo con más energía que la que produce. Hay algún indicio de que uno de los isótopos del uranio, en estado relativamente puro, podría, al ser bombardeado con neutrones, desintegrarse y dar un saldo energético positivo bastante alto. Pero ese isótopo del uranio constituye uno de los más raros de entre el grupo de los elementos raros.»



Casco vibrante de Tourette

... *cien años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «El perfeccionamiento de la técnica de la telefonía a larga distancia ha proseguido a lo largo de los últimos cinco o seis años hasta alcanzar el nivel actual, de enorme interés, en que se ha conseguido la transmisión de sonidos articulados a una distancia de más de mil quinientos kilómetros. Hemos sido invitados a la primera demostración pública del hecho, el 18 de octubre por la tarde, en las oficinas centrales de American Telephone and Telegraph Company, en Nueva York. Debemos mencionar que un elemento importante para la telefonía a larga distancia es la batería perfeccionada que ahora se emplea para alimentar el transmisor, la cual posee la cualidad de que conserva una fuerza electromotriz de alta tensión casi constante durante mucho tiempo.»

«La parálisis agitante, llamada también enfermedad de Parkinson, es un tipo muy penoso de trastorno nervioso que priva de sueño y reposo al infeliz que lo padece. Hace ya tiempo que el profesor Charcot sabía, por algunos enfermos afligidos del mal, que los viajes largos en ferrocarril o carruaje les proporcionaban un alivio indudable. Y así mandó construir un sillón que se movía en vaivén merced a un torno eléctrico. Para una persona sana, nada puede haber más insoportable que tales sacudidas, que la muelen, descomponen y agitan sus intestinos, hasta que al cabo de medio minuto pedirá clemencia. Por contra, un enfermo se arrellana en el sillón tan cómodo como en el más muelle de los sofás: mejor cuanto más agitación. Hace algún tiempo que el procedimiento fue singularmente mejorado por el doctor Gilles de la Tourette, discípulo de Charcot. Su casco vibrante lo hizo construir para tratar jaquecas y dolores de cabeza nerviosos. En la parte superior del casco hay un pequeño motor de corriente alterna que gira a 600 vueltas por minuto. En pocos minutos se experimenta una especie de lasitud general, con propensión al sueño.»

Dinámica del volcán Kilauea

El Kilauea es uno de los volcanes mejor estudiados del mundo. Su observación ha ayudado a comprender el comportamiento de los volcanes activos y anticiparse a otras erupciones destructivas posibles

John J. Dvorak, Carl Johnson y Robert I. Tilling

Al filo de la medianoche del día 2 de enero de 1983, junto con nuestros colegas del Observatorio Vulcanológico de Hawai asistimos al inicio de una de las erupciones más prolongadas y extensas que se recuerdan en la historia. Una oleada de temblores, así como la continuada hinchazón del terreno en torno del volcán Kilauea, indicaban que la tierra se estaba desgarrando lentamente bajo la creciente presión de la roca fundida, en su ascenso hacia la superficie. Casi a las 24 horas del comienzo de la actividad, apareció un resplandor rojo por el horizonte este. Al mismo tiempo, cesaron los temblores y fueron reemplazados por la inconfundible vibración rítmica —como latidos de un corazón— de la lava brotando en borbotones del subsuelo.

El volcán Kilauea continúa en erupción hoy en día. Desde 1983, sus coladas de lava han cubierto casi unos 100 kilómetros cuadrados, y han añadido unas 120 hectáreas de superficie a la isla de Hawai. Los últimos episodios de actividad del Kilauea han destruido más de 180 viviendas y hecho evacuar a cientos de personas.

Las mencionadas efusiones también han tenido importantes consecuencias positivas: el estudio del comportamiento del Kilauea ha ayudado a predecir erupciones y aminorar así las pérdidas de vidas humanas y propiedades que ellas ocasionen, como sucedió el año 1991 en la del monte Pinatubo, en las Filipinas. Por otra parte, el volcán Kilauea ofrece un mirador único para observar los procesos geológicos que operan en el interior de la Tierra. Las perforaciones geológicas más profundas apenas penetran allende 10 kilómetros, una seiscientava parte de la distancia al centro del planeta, mientras que las coladas de lava arrojadas por el Kilauea proporcionan muestras directas de materiales procedentes de decenas o tal vez centenares de kilómetros de profundidad. Cada episodio eruptivo ofrece una inestimable demostración de los procesos volcánicos que han formado más del 80 % de la superficie subaérea y subacuática total terrestre.

El Kilauea es el más activo entre los cinco volcanes que han formado la isla de Hawai, y sus erupciones han sido presenciadas a lo largo de los siglos por los habitantes de la Polinesia. Ellos le dieron el nombre de Kilauea, que significa "nube de humo que asciende". Los nativos de Hawai atribuían la actividad volcánica a las acciones de la diosa Pele, cuyo hogar tradicional es Halemaumau ("casa del fuego eterno"), el vasto cráter que se abre en la cima del Kilauea. Dicho cráter ha sido escenario de una repetida actividad volcánica, al menos desde 1820, fecha de los primeros documentos que describen el volcán Kilauea.

La mitología hawaiana sugiere que los primitivos habitantes de la Polinesia poseían un conocimiento sorprendentemente profundo de las islas que

JOHN J. DVORAK, CARL JOHNSON y ROBERT I. TILLING han trabajado todos en el Observatorio Vulcanológico de Hawai (OVH). Dvorak, especialista en análisis de procesos de deformación del terreno en volcanes activos, pertenece ahora a la plantilla del Observatorio Vulcanológico de Cascades (OVC) en Vancouver. Johnson enseña geología en la Universidad de Hawai en Hilo, y dedica los veranos a una institución de la misma, el centro para el estudio de volcanes activos, donde se adiestra a los científicos extranjeros en las técnicas de vigilancia de la actividad volcánica. Tilling trabaja en la unidad de investigación de procesos ígneos y geotérmicos del Servicio Geológico de EE.UU. en Menlo Park, California, donde examinó las respuestas de la comunidad científica ante la erupción explosiva del monte Santa Elena en 1980. Dirigía el OVH durante los años setenta, cuando se reactivó el volcán Mauna Loa tras un cuarto de siglo dormido.



1. COLADAS DE LAVA de la erupción del Kilauea. Han transformado el paisaje de Hawai. Desde 1983 hasta 1986 el volcán expulsó emisiones aisladas de lava muy espectaculares, como la que se observa al fondo en esta fotografía de 1985. La roca fundida fluye ahora del subsuelo de un modo más tranquilo y continuado. Y es ésta la manifestación más reciente de una dilatada acción geofísica que ha ido formando la cadena entera de volcanes hawaianos a lo largo de los últimos 70 millones de años.

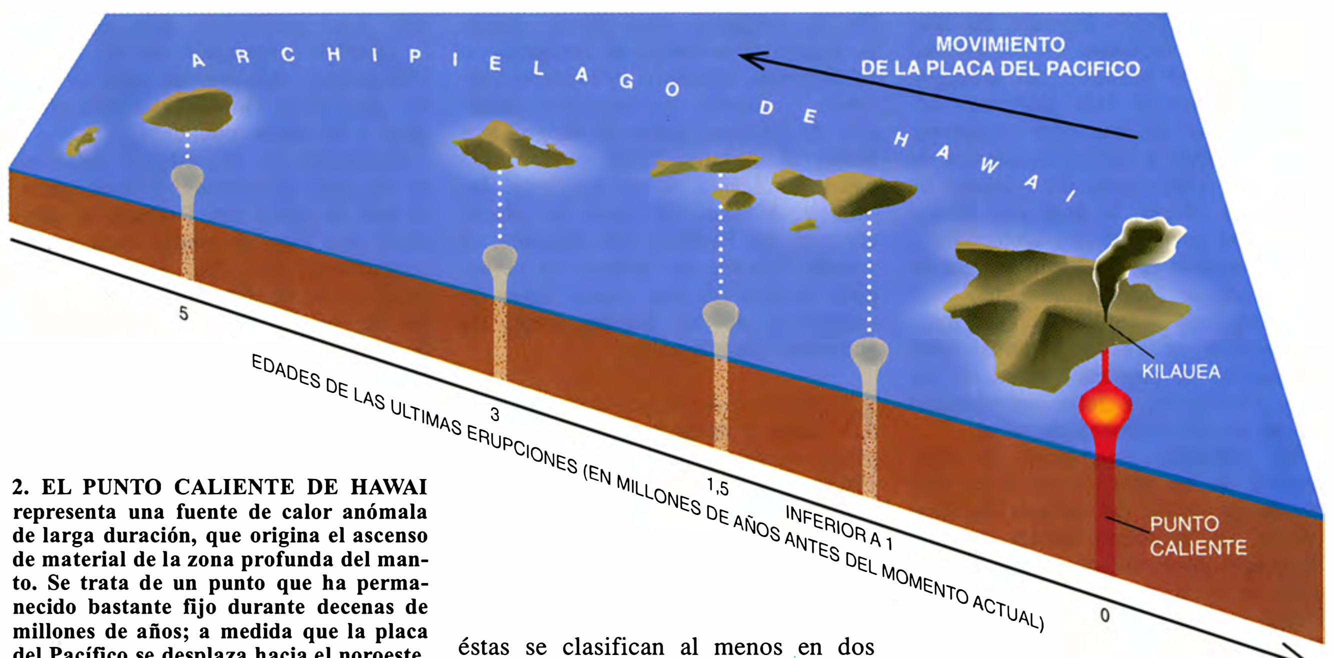
habitaban. Según la leyenda, las islas Hawai van creciendo en antigüedad del sureste al noroeste del archipiélago. Confirman esta progresividad las técnicas de datación modernas, que requieren la medición precisa de elementos radiactivos en muestras de rocas. En efecto, la gran isla Hawai es la más joven de este archipiélago; se ha formado en el último millón de años y sigue todavía creciendo. Los volcanes más antiguos de este rosario insular se sitúan a unos 5000 kilómetros al noroeste, cerca de las islas Aleutianas, y datan aproximadamente de 70 millones de años.

La ordenada progresión de antigüedad de las islas Hawai y su ubicación en mitad del océano Pacífico parece en principio desconcertante. Se acepta generalmente que la mayor parte de la actividad geológica de la Tierra está asociada a los movimientos de potentes bloques de rocas de la corteza y de la zona superior del manto terrestre, muchos de los cuales delimitan los grandes continentes. Estos bloques, o placas, yacen sobre materiales más calientes y deformables de la zona inferior del manto. En los márgenes entre placas, donde la superficie terrestre se comprime o se disgrega, tienden a producirse volcanes y fuertes movimientos sísmicos. El famoso "anillo de fuego" que rodea al océano Pacífico, formado por los volcanes de las Filipinas, Japón y Alaska, delimita la placa, enorme, del Pacífico. No obstante, el volcán Kilauea se asienta en la región central de esta placa, lejos de cualquiera de los lugares (loci) de actividad mencionados.

El misterio de la presencia del Kilauea y otros volcanes de intraplaca análogos fue explicado en 1963 por J. Tuzo Wilson, de la Universidad de Toronto. La distribución de edades de las islas hawaianas, razonaba Wilson, confirma el lento avance de la corteza oceánica sobre un punto relativamente fijo y situado a gran profundidad, por donde asciende el material fundido del manto terrestre, al cual denominó "punto caliente". Según su teoría, a medida que la placa del Pacífico procede hacia el noroeste, el punto caliente origina una sucesión lineal de volcanes. Los geofísicos han señalado la posible existencia de al menos 100 puntos calientes en todo el globo, pero el de Hawai es el más enérgico y el mejor conocido.

Partiendo de las edades relativas de las islas hawaianas, Wilson calculó que la placa del Pacífico se desplaza por término medio unos nueve centímetros por año. Las recientes mediciones de las posiciones relativas de las masas de tierra, obtenidas de la temporización de señales radioeléctricas procedentes del espacio interestelar, han confirmado que el fondo del océano Pacífico está avanzando hacia el noroeste con velocidad casi exactamente igual a la anteriormente mencionada. Cada volcán de éstos, transportado y alejado de la fuente magmática por la placa del Pacífico, se extingue al cabo de aproximadamente un millón de años, y entonces el material magmático procedente del punto caliente aflora a la superficie en una localización contigua, iniciando así la formación de un nuevo aparato volcánico. Cabe suponer que tal fue el origen de la cadena entera de islas.





2. EL PUNTO CALIENTE DE HAWAI representa una fuente de calor anómala de larga duración, que origina el ascenso de material de la zona profunda del manto. Se trata de un punto que ha permanecido bastante fijo durante decenas de millones de años; a medida que la placa del Pacífico se desplaza hacia el noroeste, los aparatos volcánicos más antiguos se extinguen y otros nuevos aparecen, por lo que las islas son progresivamente más jóvenes hacia el sureste del archipiélago. Este punto caliente en la actualidad alimenta de magma a los cinco volcanes de la isla de Hawai, incluido el Kilauea.

En 1971, W. Jason Morgan, de la Universidad de Princeton, describía con una precisión mayor la naturaleza del proceso responsable del vulcanismo del archipiélago de Hawai. Según su hipótesis, los puntos calientes eran manifestaciones superficiales de estrechos penachos constituidos por materiales extraordinariamente ardientes que ascienden a través del manto terrestre. Aunque las rocas del manto sean nominalmente sólidas, están sometidas a temperaturas tan altas y presiones tan intensas que alcanzan la fluidez, formando gigantescas corrientes que ascienden y descienden lentamente en el interior de la Tierra. En una situación de este tipo, se generan puntos calientes por encima de la corriente que sube; semejante flujo ascendente debería producir no sólo un centro de actividad volcánica (locus), sino también una protuberancia más extensa, en la superficie que rodea el punto caliente. Las mediciones del perfil de la Tierra indican que el fondo oceánico, en varios centenares de kilómetros alrededor de la isla mayor de Hawai, está realmente elevado unos pocos kilómetros sobre la corteza circundante.

El modelo de pluma de manto no indica dónde se origina el material magmático del punto caliente. Los análisis de la composición mineral de las lavas hawaianas revelan que éstas se clasifican al menos en dos categorías químicamente distintas. Una de estas categorías de lavas es muy probable que derive de la misma zona superior del manto que suministra las rocas basálticas en las dorsales oceánicas, donde se produce la separación de placas y ascienden rocas fundidas y calientes que forman un nuevo suelo marino. (El ejemplo más conocido de este fenómeno lo constituye la dorsal Centro-Atlántica, la cual emerge del nivel del mar al atravesar Islandia). En cuanto al origen de la otra categoría química de lavas del Kilauea, es muy poco lo que se sabe; numerosos geoquímicos sospechan que la constituyen minerales procedentes de una zona inferior del manto que mantiene una misma composición química desde la formación del planeta Tierra.

En su ascenso desde las regiones profundas, el material sólido sufre una notable relajación de la presión, lo que posibilita la fusión de algunos de los minerales componentes. Debido a su menor densidad, la parte fundida —más ligera— de las rocas asciende, separándose del residuo sólido a medida que migra hacia zonas menos profundas. (La roca fundida recibe el nombre de magma mientras se encuentra en el subsuelo, y de lava cuando aflora a la superficie.) Los experimentos de laboratorio indican que el material magmático ascendente se congrega en bolsas, y esos tanques de roca líquida se abren paso a través de la zona superior sólida del manto y la corteza, creando para ello grietas lenticulares por las que fluyen. Cuando el magma alcanza la zona superior de la corteza, proporciona el calor y la materia prima para las erupciones del volcán Kilauea.

Para conocer más en detalle las actividades de un volcán es necesario establecer un contacto muy próximo con una de estas infernales manifestaciones. Con tal finalidad, Thomas A. Jaggar, Jr., uno de los primeros en estudiar los procesos del vulcanismo activo, fundó el Observatorio Vulcanológico de Hawai en 1912. Este centro se levanta sobre el Uwekahuna ("acantilado de las lamentaciones de los sacerdotes"), peñón de 100 metros de altura desde donde los antiguos sacerdotes observaban el cráter Halemaumau. Al presenciar los desmanes de la ardiente diosa Pele, los sacerdotes advertían que el suelo del Halemaumau a menudo se desplomaba abruptamente, al tiempo que aparecía el rojo resplandor de una erupción a lo largo de un flanco del cráter, lo cual interpretaban como que Pele se trasladaba por un camino subterráneo desde el Halemaumau hasta las zonas más bajas del Kilauea. Desde esa misma posición privilegiada en Uwekahuna, los autores, y numerosos colegas, han sido testigos de la irrefrenable furia del Kilauea.

Las características superficiales del volcán son bastante complejas. Su cima se eleva suavemente hasta una cota de más de mil metros sobre el nivel del mar, y más de seis mil respecto al fondo oceánico. El cráter Halemaumau constituye la zona central de una caldera, región amplia y poco profunda que alcanza hasta cinco kilómetros de diámetro en algunos lugares. Dos largas y elevadas

dorsales, también denominadas zonas de fractura (rift), parten desde la cumbre; remedan en cierto modo la estructura de las dorsales oceánicas. La zona de fractura que se extiende hacia la región suroeste se halla en un relativo reposo. Casi toda la actividad reciente del Kilauea se concentra a lo largo de la otra fractura, dirigida hacia el este, la cual llega hasta más de 100 kilómetros de distancia de la cima volcánica, bastante dentro del océano Pacífico. Ambas zonas de rift se encuentran rodeadas por un gran número de fallas paralelas, grietas y conos rocosos expulsados en las erupciones anteriores.

A medida que se ha aprende a interpretar el lenguaje del volcán, el Kilauea va narrando elocuentemente, a través de continuos cambios morfológicos, los procesos que se esconden bajo su piel. En los años diez de nuestro siglo, Jaggar observó que la región cimera del volcán Kilauea sufría ondulaciones reiteradas, de lentos levantamientos del terreno y rápidas subsidencias posteriores, procesos que a menudo coincidían con alguna actividad eruptiva a lo largo de las zonas de rift. Dicho científico sugirió que tales movimientos eran causados por una lenta acumulación del magma en un embolsamiento superficial localizado exactamente debajo de la cima del volcán, seguido por una importante y rápida extrusión de este magma cuando se produce una erupción. En el modelo de Jaggar el embolsamiento magmático actúa como una especie de globo enterrado en el subsuelo del Kilauea, que, cuando se llena de nuevo material magmático, se infla y hace levantar la superficie del terreno, produciéndose después la subsidencia de la misma al extruirse el magma y por consiguiente vaciarse el tanque.

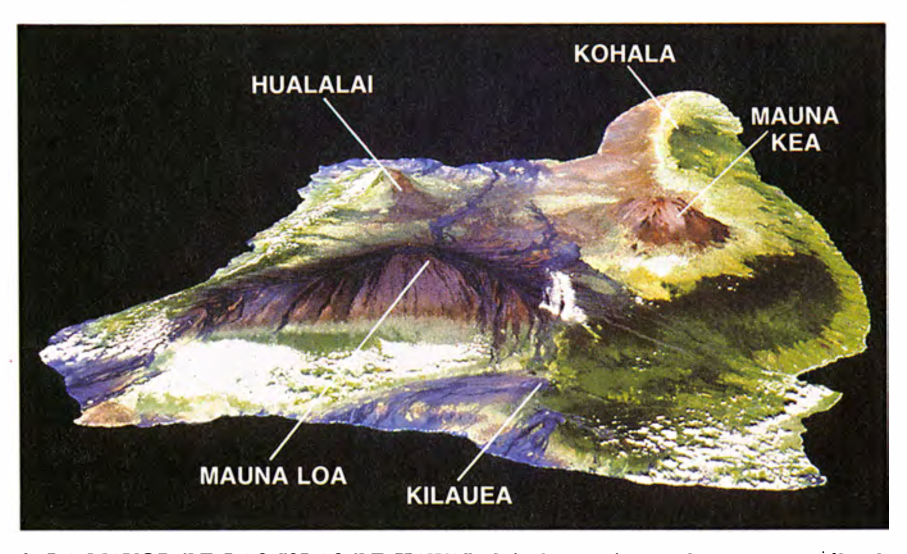
Los modelos teóricos predicen que una pequeña cavidad presurizada semejante a un globo, empotrada en la tierra, produciría un levantamiento superficial del terreno con una morfología de bóveda. Estas predicciones han logrado una rotunda confirmación merced a las mediciones topográficas de la elevación del terreno realizadas en la cúspide del Kilauea y de varios otros volcanes activos. En 1958, Kiyoo Mogi, del Instituto de Investigaciones Sísmicas de Tokyo, utilizó un modelo teórico de cavidad a presión, en unión de datos sobre los movimientos superficiales observados en el Kilauea, para estimar que el embolsamiento magmático yace a solamente tres a cuatro kilómetros por debajo de su cima, bien dentro del volumen del volcán.

En las postrimerías de la década de los sesenta, Richard Fiske y Willie Kinoshita, ambos adscritos al Observatorio Vulcanológico de Hawai, confirmaron la profundidad estimada por Mogi y encontraron que el centro de la zona de deformación se desplazaba ocasionalmente dentro de la región cimera del Kilauea. Este comportamiento indica que el embolsamiento magmático no consiste en una cavidad única, sino en una serie de cámaras conectadas, que se rellenan de magma a diferentes ritmos.

En el pasado, los geofísicos se apoyaban en las técnicas normalizadas de levantamiento topográfico para medir los continuos cambios experimentados por el Kilauea. Este método de trabajo requiere realizar repetidas mediciones en cientos de puntos de referencia escogidos sobre la superficie del volcán. Afortunadamente, en los últimos años ha entrado en servicio una red de satélites en órbita alrededor de la Tierra: el sistema de posicionado mundial ("Global Positioning System", o GPS). Estos satélites transmiten señales de radio que son captadas por receptores distribuidos por toda la superficie del volcán, los cuales poseen la capacidad de obtener medidas de sus posiciones relativas con precisión de unos pocos centímetros. A medida que el material magmático fluye desde la base del volcán, la superficie del terreno suprayacente sufre ligeras deformaciones, en elevación o hundimiento, y de esta manera modifica las posiciones de los puntos tomados como referencia. El sistema GPS nos ha resultado sumamente eficaz para el seguimiento de los procesos de deformaciones leves en el volcán Kilauea, y ello nos ha permitido conocer la profundidad y el volumen del magma encerrado.

Los expertos han iniciado ya la investigación del interior del Kilauea, sirviéndose de técnicas de tomografía, poderoso método de análisis desarrollado para obtención y examen de imágenes en medicina. Los geólogos que adoptan este enfoque examinan las ondas sísmicas que han pasado a través del volcán, y de los cambios de velocidad y dirección que sufren dichas ondas a lo largo de su trayectoria pueden inferir la estructura interna del sistema volcánico. Debido al estado de tensión permanente del terreno que rodea al Kilauea, no escasean las señales sísmicas, y así no pasa un mes sin que se produzca un terremoto de intensidad 4,0 por lo menos, suficiente para hacer sonar una vajilla. A finales de los ochenta, Phyllis Ho-Liu, que trabajaba entonces en el Instituto de Tecnología de California, obtenía imágenes tomográficas del embolsamiento magmático situado bajo la cima del Kilauea. Sus mapas muestran que este reservorio yace a unos pocos kilómetros de profundidad.

Pudiera extrañar que tras su largo recorrido a través del manto terrestre hasta la corteza, este magma ascendente se detuviera para acumularse en un embolsamiento tan cercano a la superficie. Michael Ryan, del Servicio Geológico Americano en Reston, atribuye tal comportamiento a las pequeñas diferencias en densidad entre el cuerpo magmático ascendente y los materiales rocosos encajantes que forman



3. LA MAYOR DE LAS ISLAS DE HAWAI aloja hasta cinco volcanes, pero sólo el Kilauea persiste en erupción. Se considera apagado el de Kohala, y los de Mauna Kea y Hualalai han estado inactivos durante 4000 años y 190 años, respectivamente. La última erupción del Mauna Loa se produjo en 1984.

la parte más alta del volcán. A medida que el magma asciende hacia la superficie, los gases disueltos se escapan de esta solución, igual que se libera el dióxido de carbono del agua de soda al abrirse la botella; el magma, pues, se desgasifica y se rellenan de burbujas los materiales encajantes. Por culpa de esos espacios huecos llenos de gas, la lava extruida en un proceso eruptivo presenta una densidad del 10 al 20 % menor que la que poseía cuando estos materiales se encontraban en el subsuelo; en cierto sentido, el volcán flota sobre el tanque magmático subyacente.

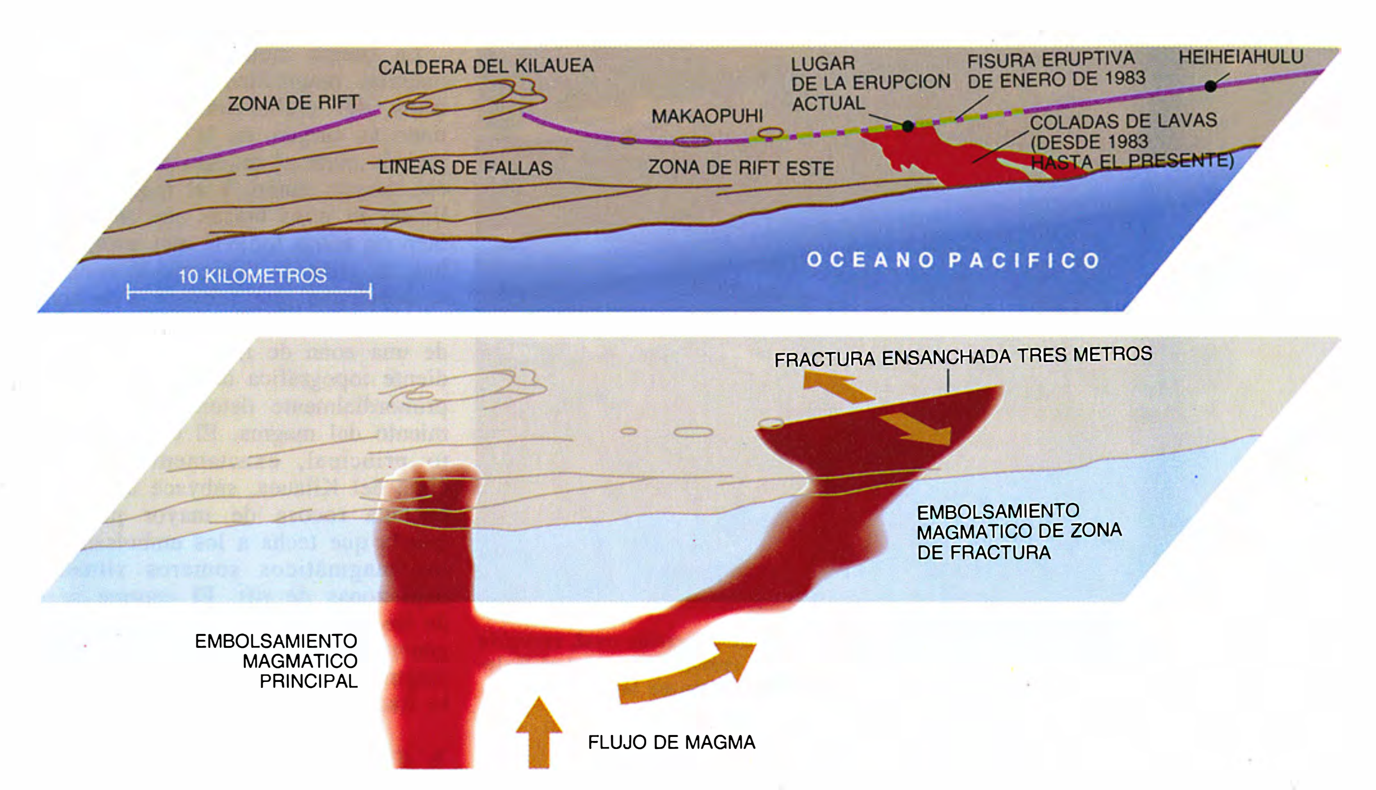
Con el tiempo, las coladas de lava del Kilauea se van enterrando, recubiertas por otros flujos de lava de erupciones posteriores. A una determinada profundidad bajo la superficie del volcán, el peso de este apilamiento de coladas lávicas aplasta y cierra las citadas burbujas. Por tanto, a medida que la profundidad aumenta, las lavas sufren una mayor presión litostática hasta alcanzar valores de densidad que igualen la que caracteriza el cuerpo magmático; este equilibrio se establece a unos tres kilómetros por debajo de la superficie del volcán Kilauea, explicándose de este modo la profundidad del embolsamiento magmático. El magma ahí encerrado sólo puede ascender a un nivel superior bajo el impulso de una presión adicional, la cual puede generarse por la inyección de magma de una fuente más profunda, derivada de la pluma de manto.

4. LA ACTIVIDAD VOLCANICA DEL KILAUEA obedece al ascenso de material caliente que se funde parcialmente a medida que se relaja la presión. El magma que sobrenada se abre paso a través de las rocas encajantes, produciendo al avanzar temblores (*cruces negras*), y se almacena en un embolsamiento a pocos kilómetros bajo la cima del Kilauea; este material puede ser expulsado directamente hacia arriba, o bien fluir por un conducto horizontal que emerge del flanco del volcán.

Desde líneas diversas de investigación se llega a la conclusión evidente de que toda la lava extruida por el Kilauea pasa a través del embolsamiento magmático que se halla debajo mismo de la cima del volcán. Esta región siempre experimenta fenómenos de subsidencia al tiempo que se producen erupciones en las zonas de fractura, lo que demuestra que existen escapes de magma del reservorio principal. Los estudios realizados en el Observatorio Vulcanológico de Hawai indican que el volumen afectado por el proceso de subsidencia es igual o mayor que el volumen de lava que emerge por la fractura (rift), salvo en el caso de que el periodo de la erupción sea superior a un mes, aproximadamente. Durante las erupciones prolongadas, es muy probable que el magma fluya con rapidez a través del sistema de conducción entero, y sea entonces continuo el ascenso de material magmático desde la parte superior del manto, a través del embolsamiento cimero, hacia la zona de rift y la superficie.

Las variaciones químicas que se presentan en las lavas del Kilauea indican también el papel crucial del tanque magmático situado bajo la cima. La composición de la lava va cambiando durante algunas de las erupciones prolongadas que se producen en zonas de rift, como sucedió en las de 1955 y 1983. Las coladas de lava que emergen al principio de una erupción de este tipo contienen minerales que cristalizan a temperaturas relativamente bajas. Es muy probable que estas lavas, comparativamente frías, estuvieran largo tiempo almacenadas en el subsuelo a poca profundidad, seguramente en el embolsamiento magmático bajo la región cimera o en un embolsamiento secundario en la zona de rift, donde la temperatura del material rocoso fundido (magma) desciende lo bastante como para que precipiten muchas especies minerales.

Al producirse una erupción en la zona de rift, la lava almacenada en el embolsamiento principal debería gradualmente ser evacuada hacia el exterior por la acción de un nuevo y ardiente cuerpo magmático que asciende desde zonas más profundas. Efectivamente, las lavas que emergen en la fase tardía de una erupción producida en zona de rift son más ricas en olivino, el primer mineral que cristaliza al enfriarse el magma; es también notoria la ausencia de muchos de los minerales de baja temperatura detectados en las coladas anteriores. La temperatura de las últimas lavas



5. ACUMULACION DEL MAGMA en tanques comunicantes, bajo la caldera del Kilauea y bajo la zona de rift este (*abajo*). Se registran erupciones cuando la presión del magma alcanza un punto crítico. Desde 1983, el magma procedente de la cámara secundaria es expulsado a lo largo de un segmento de 12 kilómetros, formándose coladas de lava (*arriba*).

es más elevada que la de sus antecesoras, indicando así que este material magmático ha pasado menos tiempo enfriándose en niveles someros.

Una prueba más de que el embolsamiento principal se comporta como una cámara de compensación del material magmático proviene de las observaciones realizadas durante las breves treguas en la actividad volcánica a lo largo del rift este del Kilauea. Al inicio de tales calmas, se producen multitud de movimientos sísmicos muy superficiales siguiendo dicha zona de fractura, entre la cima y la boca eruptiva; esos movimientos sísmicos se desarrollan probablemente por encima de un conducto horizontal por el que fluye el magma desde el embolsamiento hasta la boca eruptiva. Las obstrucciones transitorias de la trayectoria del flujo de magma originan un aumento de la presión en el extremo de ese conducto que cae bajo la cima, lo cual provoca movimientos sísmicos. Los mapas tomográficos de Ho-Liu confirman la presencia de un conducto horizontal que va desde el embolsamiento principal a la zona de rift este; dicho conducto interseca un embolsamiento situado bajo la boca eruptiva actual, y acaba debajo de la boca eruptiva prehistórica Heiheiahulu, que no da señales de actividad.

La acumulación de magma en el embolsamiento principal y el aumento de presión correspondiente en la estructura interna del volcán son las causas últimas de la actividad del Kilauea. Para una buena comprensión de la dinámica del volcán resulta, pues, fundamental calcular el ritmo de suministro de magma, y su ley de variación. Puesto que a través del citado embolsamiento parecen pasar todas las coladas de lava extruidas por el Kilauea, midiendo la velocidad de los flujos magmáticos de entrada y de salida del mismo debería poderse deducir el ritmo a que asciende el magma procedente del manto. Estos cálculos requieren conocer el ritmo de escape del magma desde el embolsamiento en cuestión, juntamente con cualquier cambio en el volumen neto de material magmático allí almacenado.

La cantidad de lava extruida es probablemente algo menor que la representada por el volumen de magma que penetra en el embolsamiento, ya que parte del material magmático que sale de tal embolsamiento puede quedarse atrapado en cavidades del subsuelo. Sin embargo, al cabo de diez o más años la relación entre la velocidad de erupción y la velocidad de suministro de magma alcanza un valor medio constante en el volcán Kilauea.

En 1958, los expertos iniciaron la medición sistemática de los cambios de volumen que experimentaba el embolsamiento bajo la cima del Kilauea. Tomando como base los cambios de forma apreciados en la superficie del volcán se estima que desde entonces el volumen de magma almacenado en dicho embolsamiento ha fluctuado en sólo 0,5 kilómetros cúbicos. En todo ese lapso de tiempo, el volcán ha arrojado casi 2 kilómetros cúbicos de lava, lo cual demuestra que la variación de tamaño observada en el embolsamiento ha sido pequeña comparada con el volumen total de magma que lo ha atravesado. El cálculo del valor medio de las variaciones observadas en la velocidad de erupción a lo largo de muchos años deberá, por consiguiente, reflejar las fluctuaciones en la velocidad a la cual se suministra material magmático al embolsamiento desde mayores profundidades.

Desde 1840 hasta hoy, la velocidad de erupción en el volcán Kilauea, promediada de diez en diez años, ha variado de 0 a 0,1 kilómetros cúbicos por año. En la primavera de 1950, tras 16 años exentos de actividad volcánica, empezó a crecer el número de movimientos sísmicos localizados debajo de la región cimera, y a elevarse el terreno que la circundaba, manifestando así que el ritmo de suministro de material magmático al embolsamiento iba en aumento. A partir de entonces, la velocidad eruptiva del volcán ha sido



6. CALDERA EN LA CIMA DEL KILAUEA, con aspecto de depresión oval, recogida en la mitad inferior de esta fotografía de 1989; el enorme cráter circular es el Halemaumau. El penacho de gases al fondo señala la actual erupción en la fractura este.

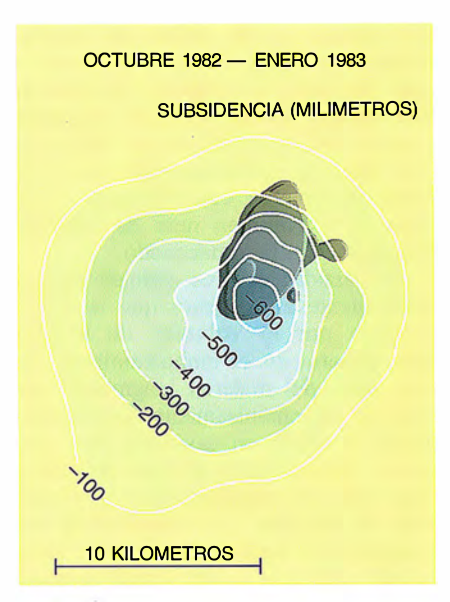
netamente superior a los valores medios que se habían detectado en largos periodos. La máxima velocidad de suministro de magma probablemente se presenta cuando el volcán se encuentra en un continuo, o casi continuo, estado eruptivo.

Donald Swanson, del Servicio Geológico Americano en Seattle, calculó que, durante tres largas erupciones, el Kilauea produjo aproximadamente 0,1 kilómetros cúbicos de lava por año, cantidad más que suficiente para llenar en una semana un gran estadio deportivo. Swanson señala que la región cimera no presentó ningún proceso de deformación claramente apreciable a lo largo de estas tres erupciones, y a raíz de tal observación concluye que el volumen de magma en el embolsamiento debe haber permanecido prácticamente constante. Durante erupciones muy prolongadas, se observa de manera evidente que el flujo de magma hacia el embolsamiento principal corre con igual rapidez que el flujo de material lávico hacia la superficie, y ello puede explicarse considerando la naturaleza de las erupciones en las zonas de fractura.

La fuerza motriz que arrastra el material magmático hacia dentro y fuera del embolsamiento principal tiene su origen en la diferencia de presión entre el magma encerrado en ese tanque cimero y el magma localizado en otras bolsas que se sitúan, bien en zonas todavía más profundas bajo la cima, o siguiendo el conducto horizontal que subyace a la zona de rift este del Kilauea. A lo largo de una zona de fractura, es la pendiente topográfica del volcán la que primordialmente determina el movimiento del magma. El embolsamiento principal, exactamente bajo la cima del Kilauea, subyace a una secuencia rocosa de mayor potencia que la que techa a los embolsamientos magmáticos someros situados bajo zonas de rift. El enorme peso de los materiales rocosos de la cima genera una presión tal que estruja el magma y tiende a proyectarlo hacia la fractura.

Mediante unas sencillas observaciones realizadas en el Observatorio Vulcanológico de Hawai se ha confirmado el efecto de la topografía del Kilauea sobre las erupciones. El volumen de lava extruido durante una erupción en zona de rift —y en consecuencia el volumen de magma escapado del embolsamiento principal— es proporcional a la elevación del lugar de la fractura donde se produce la erupción. Las erupciones más abundantes en tales zonas aparecen en las cotas menores, donde se registran las mayores diferencias de presión entre el embolsamiento principal y la boca eruptiva.

Durante una erupción volcánica en zona de rift, la efusión de material lávico es muy intensa; asimismo, la salida de magma del embolsamiento principal tiene un carácter repentino, con lo que disminuye la presión dentro de dicha cámara magmática y se crea una diferencia de presión muy apreciable entre el embolsamiento citado y las fuentes de material magmático, más profundas, que lo alimentan. Esta diferencia de presión, a su vez, provoca que el embolsamiento se rellene rápidamente de nuevo material magmático, proceso que se manifiesta en la superficie exterior por una brusca elevación del terreno de la cumbre volcánica. A medida que la cámara magmática se rellena, esta diferencia de presión disminuye, y el ritmo de intrusión de magma procedente de zonas más profundas se va haciendo más lento, hasta llegar a un equilibrio que subsistirá en tanto que la velocidad de intrusión de nuevo magma sea suficiente para



7. LOS MAPAS DE DEFORMACION de la cima del Kilauea muestran que la superficie se ha elevado (*color naranja*) mientras el magma se acumulaba en el embolsamiento subyacente (*izquierda*). La subsidencia de la cima (*color azul*) se produce al empezar la erupción de lava por la superficie (*derecha*).




8. DOS CARAS DEL KILAUEA o la mudable naturaleza del volcán. En los tres primeros años de la erupción actual se expulsaban periódicamente cantidades ingentes de lava (*izquierda*) en la zona de rift este. Desde 1986 la erupción del volcán se ha pacificado hasta crear un lago de lava que está cubierto de una fina corteza de roca solidificada (*derecha*).

mantener las enormes efusiones lávicas en las referidas zonas de rift.

Suponiendo que el razonamiento anterior sea correcto, cabe esperar que las erupciones frecuentes en las fracturas ocasionen una alta velocidad de intrusión de nuevo magma en la cámara principal. Los datos obtenidos de las erupciones históricas se ajustan claramente a tal predicción: entre 1840 y 1950 solamente hubo seis erupciones, mientras que desde 1950 se han producido 17 erupciones en zona de fractura, y en ellas el volcán Kilauea ha expulsado lava a velocidad mucho mayor. La presión del embolsamiento o cámara principal parece ejercer control tanto sobre la frecuencia de las erupciones como sobre la velocidad a la cual se suministra nuevo magma a la base del volcán.

Cuando ha terminado una erupción, se producen tapones de rocas solidificadas que bloquean la trayectoria a lo largo de la cual circuló el magma. Aunque visto desde fuera el Kilauea pueda entonces parecer pacífico, se están creando intensas presiones en la estructura interna del volcán a medida que el magma continúa ascendiendo desde el manto hacia el embolsamiento principal. Cuando esta cámara vuelve a llenarse, agotando su capacidad, la presión interna sobre las rocas encajantes hace que éstas se resquebrajen, abriéndose nuevas trayectorias en el subsuelo. Finalmente el magma se abre paso reventando la superficie, y se inicia así otra erupción en un lugar diferente. En otoño de 1982, pudimos comprobar, con nuestros propios ojos, el inicio de este proceso.

El 25 de septiembre de aquel año, una breve erupción de escasa intensidad hizo sospechar al personal científico del Observatorio Vulcanológico de Hawai que el magma embolsado bajo el Kilauea estaba sobrepasando la capacidad límite de la cámara. Abonaban tal sospecha el continuo incremento en la elevación del terreno de la cima y una desusada proliferación de movimientos sísmicos centrados bajo esa zona. Los temblores acusados en la superficie indicaban que la presión en la cámara magmática principal había alcanzado valores suficientemente altos para agrietar las rocas circundantes.

A lo largo de la semana posterior a la erupción de septiembre, los movimientos sísmicos superficiales se extendieron desde la región de la cima hasta la porción contigua de la zona de rift este, señalando así la migración de magma por un conducto subterráneo que discurre desde el embolsamiento principal bajo la cima hasta dicha zona de fractura. Sometidas a una rápida elevación de la presión interna, las rocas que conformaban el conducto empezaron a resquebrajarse y desplazarse, procesos que fueron claramente registrados por los sismómetros.

Hacia diciembre, la continua acumulación de magma en el embolsamiento principal forzó la salida de material rocoso fundido hacia la zona de rift este en dirección al Makaopuhi, cráter volcánico situado a unos 20 kilómetros al este de la caldera del Kilauea. En esa región de Makaopuhi se habían producido varias erupciones de corta duración entre 1963 y 1969. Los científicos que miden los movimientos del terreno en el volcán Kilauea dedujeron que existía un embolsamiento magmático secundario emplazado bajo el Makaopuhi, en el cual probablemente quedó atrapada una porción de magma.

Los registros de movimientos sísmicos indican que el magma avanzó desde el embolsamiento principal en varios estallidos breves, durando cada uno de ellos pocas horas y alejándose de la caldera algunos kilómetros más que el estallido anterior. Por último, el 2 de enero de 1983, una rápida sucesión de terremotos superficiales cerca del Makaopuhi y una repentina elevación del terreno anunciaban que el magma había colmado el embolsamiento secundario y comenzaba a empujar para alcanzar la superficie.

A juzgar por la forma de la elevación del terreno observada, el magma empezó su trayectoria ascendente alrededor de tres kilómetros por debajo del Makaopuhi, muy probablemente en el extremo superior de un embolsamiento magmático secundario. Mediante simulaciones por ordenador realizadas en el laboratorio se ha podido examinar la naturaleza de la ascensión final del magma. El material magmático se abrió camino por un resquicio abierto en el techo del tanque y se extendió con rapidez ho-

rizontal y verticalmente, manteniendo muy fino su espesor, por lo que llegó a parecerse a una lámina. La lava fue expulsada del subsuelo a lo largo de una fisura de 12 kilómetros de longitud, en la cual se producía la intersección de estas láminas de magma con la superficie. La formación de esta fisura ensanchó la zona de rift este alrededor de tres metros, generando así un proceso de compresión en la zona contigua de la vertiente sur del volcán Kilauea.

En los tres años y medio posteriores, el Kilauea fue arrojando de manera episódica espectaculares emisiones de lava a lo largo de su zona de rift este. La mayoría de estas expulsiones de lava duraban menos de un día, e iban seguidas de periodos de reposo de un mes. En el verano de 1986, y tras la apertura de varias fisuras nuevas, cesaron las emisiones de lava espectaculares; desde entonces, el material fundido ha fluido, sin apenas solución de continuidad, hacia un enorme lago de lava interior. Actualmente, el material lávico de este lago ha sido drenado a través de tubos volcánicos hacia los terrenos colindantes, y se ha formado un nuevo lago de lava algunos kilómetros más cerca de la caldera de la cima.

Es innegable que habitar en las cercanías de un volcán activo comporta ciertos riesgos. Las rocas fundidas y las emanaciones sulfurosas que acompañan a las erupciones constituyen amenazas reales. Ocasionalmente agitan al volcán Kilauea violentas explosiones de vapor, una de las cuales, ocurrida en 1790, causó un gran número de bajas. Durante la presente erupción, las coladas de lava han llegado hasta el océano, generando así una nociva nube de vapor con fuerte contenido de ácido clorhídrico, llamada por los residentes locales "smog" volcánico o "vog".

Otro tipo de amenaza natural, menos familiar, que se cierne sobre el Kilauea y sobre otros muchos volcanes, es la posibilidad de que se produzca un terremoto de gran magnitud. La tasa anual de movimientos sísmicos localizados en el subsuelo de la vertiente sur del Kilauea es comparable a la frecuencia de terremotos que se generan en uno de los segmentos más activos de la falla de San Andrés, situada en el sur de California y noroeste de México. Cada dos semanas aproximadamente el volcán Kilauea genera movimientos sísmicos perceptibles por una persona. Uno de los terremotos más poderosos que han ocurrido en todo este siglo en el territorio de los EE.UU. de América se produjo en la vertiente sur del Kilauea el 29 de noviembre de 1975 y alcanzó la intensidad de 7,2 en la escala de Richter. El Observatorio Vulcanológico de Hawai ha instalado por toda la isla una red de cuatro docenas de sismómetros para el registro de estos fenómenos. Los resultados obtenidos revelan que el aumento de la frecuencia de movimientos sísmicos superficiales (aquellos cuyo centro está a muy pocos kilómetros por debajo de la superficie) es una buena señal preventiva de una futura erupción del volcán.

La mayoría de los terremotos, como los de California por ejemplo, son debidos a los roces de las placas tectónicas. Pero los frecuentes terremotos en torno del Kilauea obedecen al corrimiento de rocas provocado por los cambios de presión en el subsuelo. Los movimientos sísmicos en la vertiente sur del volcán son resultado del movimiento masivo de magma, especialmente dentro de una zona de rift, como ocurrió en enero de 1983. Durante varias semanas después del episodio eruptivo mencionado, el flanco sur del volcán fue sacudido por un elevado número de terremotos, que probablemente respondían a la repentina compresión ejercida por la abertura de tres metros de ancho aparecida en esa zona de fractura. La persistente abundancia —por encima de la media— de movimientos sísmicos fuertes (de intensidad 5,0 o mayor) registrados desde 1983 es indicativa del efecto de los cambios de presión sobre las rocas encajantes.

Para conocer mejor esos procesos dinámicos de ajuste, en el Observatorio Vulcanológico de Hawai se estudió con minuciosidad el movimiento sísmico más intenso ocurrido después de 1983; alcanzó una intensidad de 6,1 y se produjo el 25 de junio de 1989. Por medio del GPS determinamos las localizaciones exactas de nuestras estaciones de medida un año antes y dos meses después del terremoto. Las últimas mediciones nos indicaron que las estaciones del flanco sur se habían desplazado hacia el mar hasta en un tercio de metro, mientras que las demás estaciones del Kilauea también habían avanzado generalmente hacia el mar, aunque menos. Estos desplazamientos eran el efecto de liberar una parte de la presión compresiva acumulada desde la erupción de 1983 y anteriores episodios eruptivos en la zona de rift.

El estudio del volcán Kilauea ha cristalizado en ideas que contribuyen al conocimiento general del vulcanismo activo y los procesos sismológicos. Aun cuando los aparatos volcánicos presentan grandes diferencias en el estilo eruptivo así como en su asentamiento geológico, todos los volcanes activos parecen compartir un mismo rasgo: su fuerza motriz la proporciona el ascenso de magma desde zonas profundas de la región del manto hacia cámaras más someras situadas en la corteza terrestre o dentro de la misma estructura del volcán. La localización y el señalamiento cartográfico de estos tanques son fundamentales para el éxito de un programa de predicción de erupciones volcánicas. En particular, las exhaustivas investigaciones del embolsamiento magmático situado bajo la cima del volcán Kilauea han servido de base para comprender la estructura interna de otros volcanes activos.

También ha aportado el Kilauea una valiosa experiencia de campo para cuantos han trabajado posteriormente en las condiciones de febril agitación, y a veces de inminente riesgo, que acompañan la erupción de cualquier volcán. La rápida respuesta científica ante la reactivación del monte Santa Elena en 1980 aprovechó las técnicas de vigilancia de actividad sísmica y deformaciones geológicas que se desarrollaban en el Kilauea. Ciertas técnicas elaboradas en este volcán —especialmente el estudio de modelos de terremotos— fueron esenciales para la predicción satisfactoria de la erupción del Pinatubo en junio de 1991, el segundo o el tercer episodio eruptivo más intenso de este siglo, cuyos efectos se han dejado sentir en el clima terrestre. Esta predicción salvó miles de vidas humanas y dio tiempo suficiente para la evacuación de bienes de equipo costosísimos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHEMICAL VARIATION IN KILAUEA ERUPTIONS 1971-1974. Thomas L. Wright y Robert I. Tilling en *American Journal of Science*, vol. 280-A: *The Jackson Volume*, 2.ª parte, págs. 777-793; 1980.

VOLCANISM IN HAWAII. Dirigido por Robert W. Decker, Thomas L. Wright y Peter H. Stauffer. U. S. Geological Survey Professional Paper 1350. U. S. Government Printing Office, 1987.

NATURE OF LOCAL MAGMA STORAGE ZONES AND GEOMETRY OF CONDUIT SYSTEMS BELOW BASALTIC ERUPTION SITES: PU'U 'O'O, KILAUEA EAST RIFT, HAWAII EXAMPLE. Lionel Wilson y James W. Head III en *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n.º B12, págs. 14.785-14.792; 10 de diciembre de 1988.

Endotoxinas bacterianas

Parte integrante de muchas bacterias, representan para el hombre una seria amenaza al mismo tiempo que pueden reportarle grandes beneficios. ¿Cómo bloquear sus efectos perniciosos y aprovecharse de los buenos?

Ernst Theodor Rietschel y Helmut Brade

Las endotoxinas encierran una fascinación rayana en lo fabuloso. Diríase que la naturaleza las dotó de virtudes y de vicios en proporciones exactas y encantadoras que las hacen irresistibles para cualquier investigador que se acerque a ellas.

Estas palabras, pronunciadas hace ya casi 30 años por Ivan L. Bennett, Jr., de la Universidad Johns Hopkins, siguen siendo válidas en nuestros días. Las endotoxinas, moléculas potencialmente letales producidas por muchas bacterias —incluidas las responsables del cólera, tos ferina, la peste y cierta forma de meningitis—, continúan cautivando el interés de médicos y biólogos.

De los vicios que hacen a las endotoxinas "irresistibles", quizás el más impresionante sea el de su poder alumbrador de síntomas patológicos, desde escalofríos y fiebre al choque irreversible (fallo circulatorio que lleva a la claudicación de órganos en todo el organismo) y la muerte. Y crean un escudo rígido en las bacterias que las portan, bloqueando así la acción de muchos antibióticos utilizados para combatir la infección microbiana.

Paradójicamente, las propias endotoxinas que amenazan la salud humana podrían estimular la resistencia inmunitaria del organismo ante infecciones bacterianas o víricas y frente al mismo cáncer. En opinión de algunos, la exposición a estas moléculas podría llegar a ser determinante para el desarrollo adecuado del sistema inmunitario y de su funcionamiento normal.

Como etapa ineludible para conocer de qué forma las endotoxinas provocan efectos tan dispares y contrarios, docenas de equipos investigadores, incluido el nuestro del Instituto de Investigaciones Borstel, concentraron sus esfuerzos en la identificación de su estructura química y tridimensional. Los hallazgos han permitido establecer los componentes responsables del comportamiento de la endotoxina en el organismo y han generado nuevas ideas sobre cómo limitar su capacidad patogénica y sacarle partido a su poder reforzante de las defensas inmunitarias.

La historia de las endotoxinas arranca de las postrimerías de los años setenta del siglo pasado, poco después de que Robert Koch, que entonces trabajaba por su cuenta en Wollstein, estableciera que las enfermedades infecciosas tenían su origen en un microbio específico. No habían transcurrido diez años, e investigadores de Francia, Alemania, Estados Unidos y otros países pusieron de manifiesto que las toxinas producidas por las bacterias eran causa frecuente del enfermar.

Se comenzó aislando las exotoxinas, sustancias venenosas segregadas activamente por muchas bacterias, como las responsables, entre otras, de la difteria, el tétanos o el botulismo. Sabemos hoy que las exotoxinas son, por lo general, proteínas; en aquel entonces, sin embargo, la característica fundamental que guió su identificación fue la susceptibilidad de inactivarse por calentamiento.

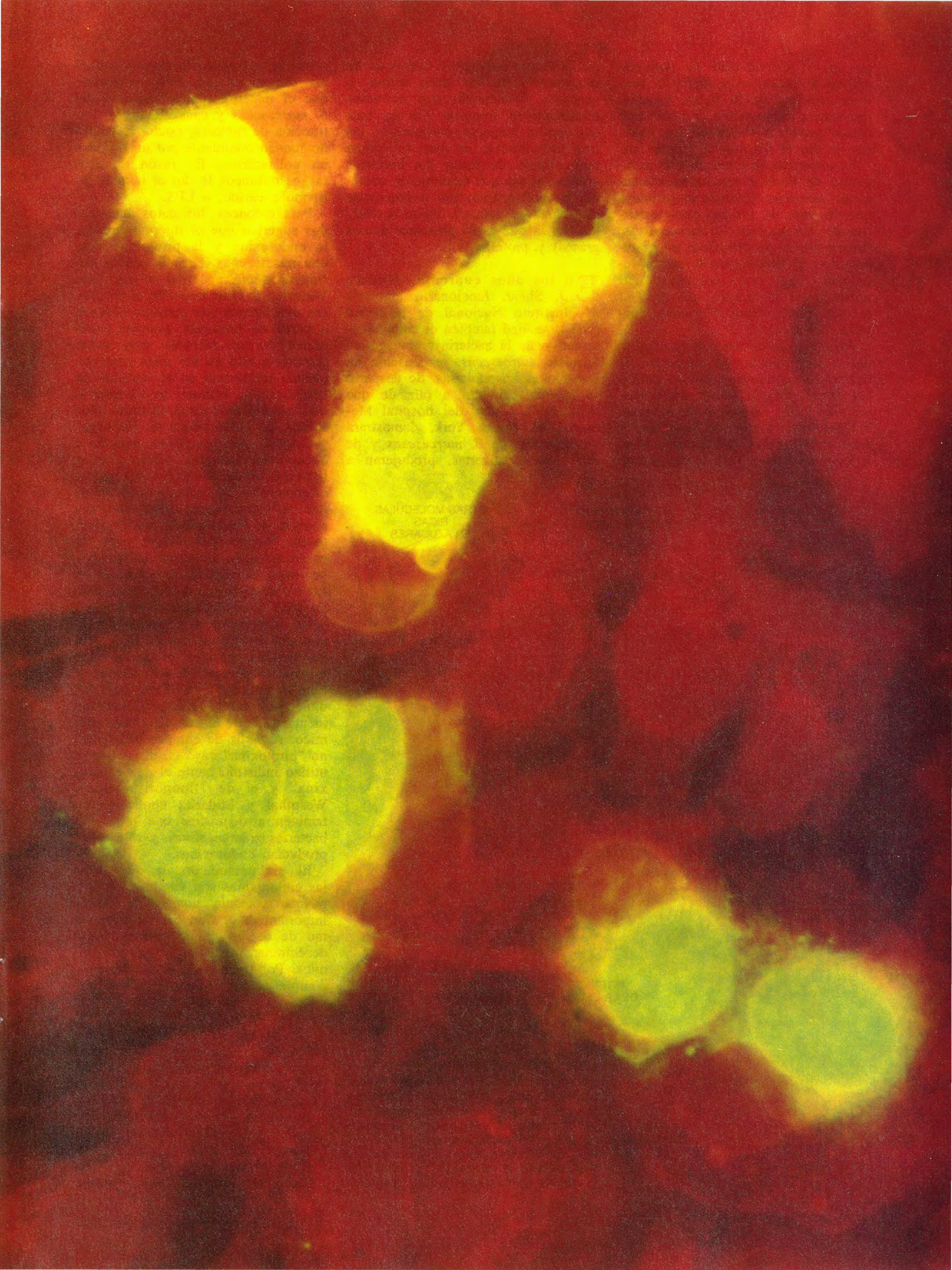
En 1892, dos científicos que trabajaban sin mutua relación dieron cuenta de la existencia de otras sustancias tóxicas que no encajaban dentro del perfil de las exotoxinas. Richard Pfeiffer, discípulo de Koch, descubrió que la bacteria *Vibrio cholerae*, causante del cólera, sintetizaba, además de una exotoxina termolábil, una sustancia resistente al calor que la célula bacteriana no segregaba al exterior. (Las bacterias son organismos unicelulares.) Este segundo producto parecía liberarse sólo cuando el *V. cholerae* se desintegraba. Las toxinas resistentes al calor ya habían sido objeto de estudio, especialmente por parte del fisiopatólogo danés Peter Ludwig Panum, pero sólo Pfeiffer advirtió que no se vertían activamente al exterior.

Dando por supuesto que esa segunda sustancia permanecía en el interior de la bacteria, Pfeiffer añadió el prefijo griego "endo", que significa "dentro", al de "toxina" y llamó endotoxina a la sustancia descubierta. El trabajo posterior denunciaría, sin embargo, la inexactitud del término: las endotoxinas residen en la superficie de la bacteria, no en su interior.

Mientras Pfeiffer se afanaba en sus investigaciones en Alemania, Eugenio Centanni, del Instituto de Patolo-

ERNST THEODOR RIETSCHEL y HELMUT BRADE se hallan adscritos al Instituto de Investigaciones Borstel, de la ciudad alemana del mismo nombre, que dirige el primero. Rietschel viene estudiando las endotoxinas desde hace más de 20 años, cuando realizó su trabajo de doctorado, bajo la guía de Otto Westphal y Otto Lüderitz, en el Instituto Max Planck de Inmunología en Friburgo. En 1980 fue contratado por la Universidad de Lübeck para enseñar inmunoquímica y microbiología bioquímica. Desde 1990 preside la Sociedad Internacional para el Estudio de las Endotoxinas. Brade se doctoró en medicina en la Universidad de Düsseldorf en 1976 y trabajó junto a Lüderitz en Friburgo antes de iniciar su colaboración con Rietschel en 1983. En la actualidad es profesor asociado y director de la división de microbiología bioquímica en el Instituto Borstel.

1. MOLECULAS de endotoxina sintetizadas por bacterias *Clamidia trachomatis* que se han multiplicado en el interior de fibroblastos de ratón (*esferas rojas*); el realce se debe a la fluorescencia (*amarillo verdoso*). Las endotoxinas son responsables de muchos de los síntomas de enfermedades producidas por bacterias gramnegativas. Entre estos microorganismos se encuentran los causantes del cólera, la tos ferina, la peste, ciertas formas de intoxicación alimentaria, la neumonía y la meningitis. Los fibroblastos de la imagen están ampliados unas 1500 veces.



gía de la Universidad de Bolonia, extraía de *Salmonella typhi*, la bacteria causante de la fiebre tifoidea, una toxina termoestable. Y como este tóxico producía fiebre en los conejos, le dio el nombre de pirotoxina.

La pirotoxina de Centanni y la endotoxina de Pfeiffer resultaron básicamente idénticas. También es palmario que se trata de toxinas características de las bacterias gramnegativas. (Las bacterias se clasifican en grampositivas y gramnegativas según retengan o no cierto colorante azul utilizado en la técnica que ideó el médico danés Hans Christian Joachim Gram.)

Para llegar a esa comprensión, hubo que esperar, sin embargo, el desarrollo de nuevas técnicas químicas. André Boivin, del Instituto Pasteur de París, Walter T. J. Morgan, del Instituto Lister de Londres, y Walther F. Goebel, del Instituto Rockefeller de Nueva York, consiguieron los primeros resultados analíticos de importancia en los años treinta y cuarenta. Trabajando con extractos relativamente impuros —a lo más que podía llegarse entonces— los tres coincidieron en que la toxina termoestable de todas las bacterias gramnegativas que examinaron contenía un polisacárido (un polímero de moléculas de azúcar), lípido (estructura en la que están presentes ácidos grasos) y proteína.

En los años cuarenta, Murray J. Shear, funcionario entonces del Instituto Nacional de la Salud (NIH), analizó también el componente activo de la bacteria gramnegativa *Serratia marcescens*, responsable de infecciones hospitalarias. Se despertó su interés por ello a raíz de que William B. Coley, del hospital Memorial de Nueva York, demostrara que mezclas de *S. marcescens* y de *Streptococci*, muertas, produjeran a veces la regresión de algunos tumores cancerosos. En 1943 determinó que el material tóxico, extraído del *S. marcescens* y causante de la destrucción de tumores, estaba constituido fundamentalmente por un lípido y un polisacárido. En razón de esos rasgos químicos le dio el nombre de lipopolisacárido, o LPS.

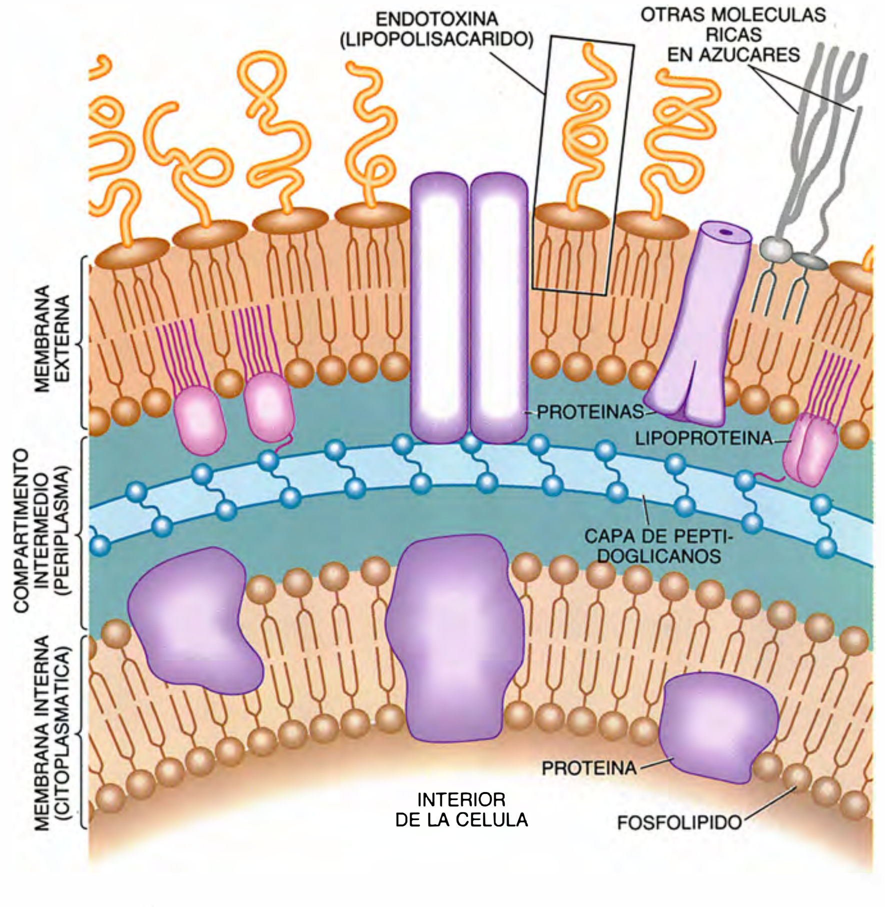
Para entonces, los datos acumulados sugerían que el lipopolisacárido, la endotoxina y la pirotoxina eran una misma cosa. Pero la prueba definitiva debió aguardar a que Otto Westphal y Otto Lüderitz desarrollaran una técnica que permitía obtener, a partir de bacterias, grandes cantidades de un extracto muy puro. Acontecía ello en los años cuarenta, cuando trabajaban en el Instituto de Investigación Wander de Säckingen, denominado más tarde Instituto Max Planck de Inmunología de Friburgo.

Después de aplicar el método a *Salmonella, Serratia, Vibrio* y otras bacterias afines, Westphal y Lüderitz establecieron de manera concluyente que el componente tóxico constaba siempre de lípido y polisacárido, junto con fósforo (que influye sobre las propiedades de los otros dos componentes). La proteína encontrada en los extractos primeros no era necesaria para la toxicidad.

La investigación posterior reveló que, con independencia de su origen, las toxinas aisladas producían una misma respuesta en los animales. Este resultado significaba que las moléculas debían ser prácticamente idénticas desde el punto de vista químico. A partir de entonces, el término "pirotoxina" cayó en desuso, y se utilizó indistintamente el de "endotoxina" y el de "lipopolisacárido". Westphal y Lüderitz contribuyeron también a demostrar que todas las bacterias gramnegativas, y sólo éstas, producían endotoxinas.

El esclarecimiento de que todas las endotoxinas son variantes de una misma molécula supuso un avance importantísimo. Conocer su mecanismo de acción exigía, sin embargo, desentrañar mejor su estructura química. Por tratarse de moléculas muy complejas, la ciencia necesitó otros veinticinco años para dibujar un cuadro más definitivo.

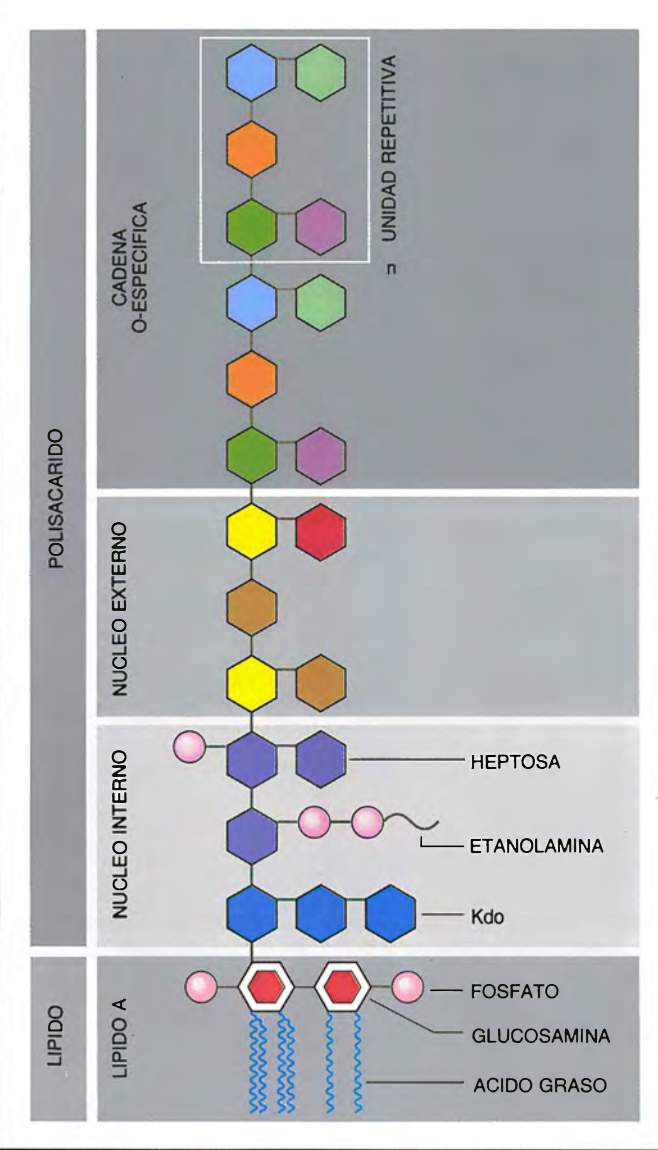
La mayoría de los numerosos estudios se centraron en las bacterias gastrointestinales (entéricas), un grupo extenso que forma parte de la flora normal del intestino o producen alteraciones gastrointestinales. Se cuentan, entre ellas, algunas de las que pertenecen a los géneros *Salmonella* y *Escherichia*; por ejemplo, *E. coli*, tan apreciada por los bióło-



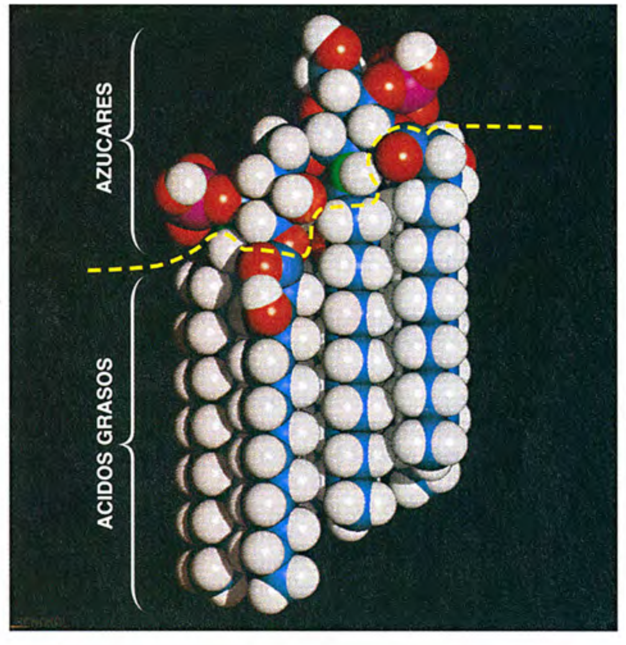


2. LAS ENDOTOXINAS RESIDEN en la membrana externa de la bacteria *E. coli* (*microfotografía*), de la que se muestra una sección transversal en forma esquemática. El corte pone de manifiesto la estructura de doble membrana que envuelve la bacteria. Una membrana externa rica en endotoxinas es un rasgo característico propio de las bacterias gramnegativas.

Estructura de la endotoxina



La estructura química de la endotoxina sintetizada por *Salmonella typhimurium* (*izquierda*) está constituida por un polisacárido, o largas cadenas de azúcares (*cada color representa un azúcar diferente*), y el lípido A. El polisacárido, que varía de una especie bacteriana a otra, consta de una cadena O-específica (formada por unidades repetitivas de tres a ocho azúcares) y un núcleo constituido por dos partes. El lípido A abarca dos glucosaminas modificadas por fosfato (PO_4) y un número variable de ácidos grasos. Manfred Kastowsky y Harald Labischinski han construido un modelo de la estructura tridimensional del lípido A de *Escherichia coli* (*abajo*), que es idéntico al lípido de *S. typhimurium*. Las cadenas de ácidos grasos, integradas por átomos de carbono (*azul*) e hidrógeno (*blanco*), cuelgan de los azúcares (*región inclinada, arriba*). Las esferas rojas, verdes y moradas representan oxígeno, nitrógeno y fósforo.



gos moleculares. La mayoría de las cepas de *E. coli*, como las que se encuentran ordinariamente en el intestino, son benignas (al menos mientras permanecen en el intestino). Otras, en cambio, pueden ocasionar enfermedades graves.

En el curso de estos estudios los investigadores han averiguado que el componente lipídico, el lípido A, está incrustado en la membrana externa, la "piel", de la célula bacteriana; a diferencia de las células del organismo humano, la bacteria carece de núcleo. El lípido A constituye una buena parte de la mitad externa de la membrana, que tiene dos capas. El polisacárido, en cambio, se proyecta hacia fuera como un pelo sobre la cabeza. El lípido se prolonga por una región compuesta por dos partes distintas: un núcleo, constituido por un oligosacárido (una ristra corta de azúcares), que está conectado al lípido, y la cadena O-específica, más larga, que se proyecta a partir del núcleo molecular y es la porción más externa de la endotoxina.

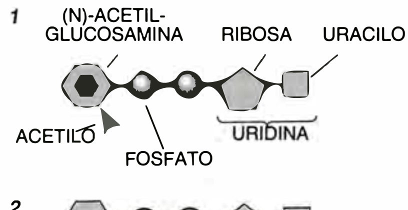
La cadena O-específica ha resultado ser el segmento más variable y también la parte que precisamente evoca la reacción inmunoespecífica; es decir, la que estimula la producción de moléculas de anticuerpos capaces de reconocer esa cadena O-específica, pero no otras moléculas. En los años sesenta, Westphal y Lüderitz descubrieron algo fundamental: la cadena suele diferir de una especie a otra; por ello, una variante de una *Salmonella* ostentará su propia cadena O-específica y generará sus propios anticuerpos. Típicamente la cadena está constituida por un conjunto de 20 a 40 unidades repetitivas que incluyen hasta unos ocho azúcares. Los tipos y secuencia de azúcares dentro de la unidad básica y el número de unidades repetitivas difieren entre sí con bastante frecuencia.

No ha resultado ser tan variable el núcleo constituido por el oligosacárido, dividido a su vez en núcleo interno (la parte unida al lípido) y núcleo externo (la parte unida a la cadena O-específica). Menor es también su influjo en el organismo, aunque pueda provocar la producción de anticuerpos en respuesta a mutantes de la endotoxina que carecen de la cadena O-específica.

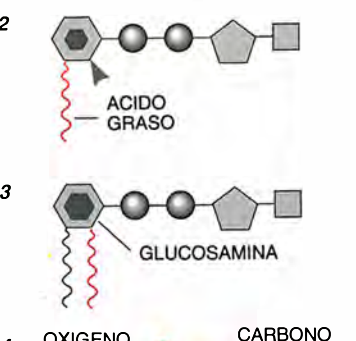
El segmento interno es el más llamativo de los dos por ser portador de azúcares poco habituales. Así, la heptosa, que posee siete carbonos, en vez de los seis que suele ser lo ordinario entre los azúcares. Otro componente es el Kdo (ácido 3-desoxi-D-mano-2-octulosónico), que se

Así sintetizan las bacterias el lípido A

La síntesis del lípido A representada en el esquema corresponde a *E. coli*; es semejante a la que tiene lugar en otras bacterias gastrointestinales. (En cada paso, los cambios de la estructura previa están indicados en rojo.) Los cinco pasos primeros fueron descubiertos por Christian R. H. Raetz y sus colaboradores en la Universidad de Wisconsin; los pasos finales se deben a Mary Jane Osborn y a sus colaboradores en el Centro de Salud de la Universidad de Connecticut.

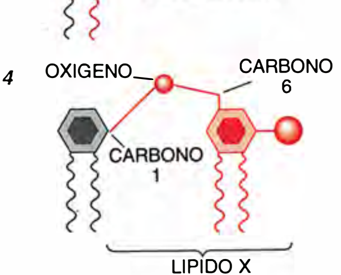


1. La bacteria comienza la construcción del lípido a partir de un precursor: el azúcar (*N*)-acetil-glucosamina unido a la uridina a través de dos fosfatos.

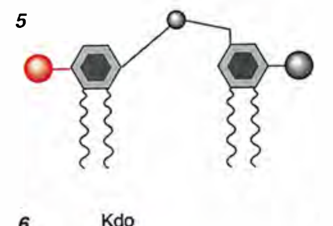


2. Se agrega un ácido graso a la (*N*)-acetil-glucosamina.

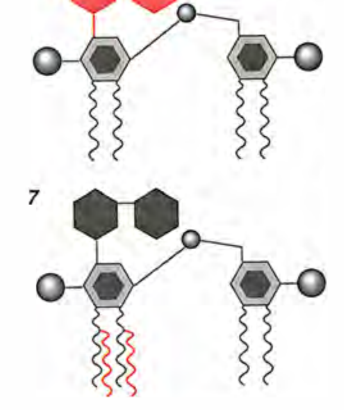
3. La eliminación del grupo acetilo convierte la (*N*)-acetil-glucosamina en glucosamina, al mismo tiempo que se intruduce un ácido graso en lugar del grupo acetilo.



4. Sigue un proceso controlado enzimáticamente que reemplaza los dos fosfatos y la uridina por el lípido X, un glucosamina que lleva un grupo fosfato y dos ácido grasos.



5. Ahora la glucosamina original adquiere un grupo fosfato...



6. ...después de lo cual, dos azúcares Kdo del núcleo interno, que une el lípido al resto del núcleo, se añaden a la glucosamina.

7. El lípido A se completa con la adición de dos ácidos grasos más. (Entonces, el resto del núcleo se engancha al Kdo unido al lípido A, y se añade la cadena O-específica.)

Al interponerse en la construcción del lípido A, se impide que la bacteria se reproduzca. Se están investigando análogos del Kdo, que bloquean el crecimiento del lípido A después del paso 5 y detienen por consiguiente el desarrollo del resto de la molécula de endotoxina.

encuentra en todas las endotoxinas y une el polisacárido al lípido. El Kdo contiene ocho átomos de carbono; en la naturaleza aparece formando parte de esas estructuras, además de darse en ciertas plantas y algas. Como veremos más adelante, su ubicuidad y sus características peculiares le convierten en un objetivo potencial de posibles terapias.

En términos de salud humana, el tercer componente, el lípido A, es el más sugestivo. Esta región, la menos variable desde el punto de vista estructural, es la que da lugar a todos los males que las toxinas infligen y al beneficio que reportan —redoblan la resistencia ante las infecciones y el cáncer—.

En 1954, Westphal y Lüderitz descubrieron que el lípido A estaba constituido fundamentalmente por un azúcar —la glucosamina—, un grupo fosfato (PO_4) y ácidos grasos de cadena larga, cada uno de ellos con unos 14 átomos de carbono. Mas hasta 1969 no se supo de qué modo se unían entre sí dichos componentes. Fue Jobst Gmeiner, entonces colaborador de Westphal y Lüderitz, quien demostró que el lípido A presente en una cepa de *Salmonella minnesota* incluía dos moléculas de glucosamina, ambas fosforiladas.

Por si fuera poco, los átomos de carbono que enlazaban las dos glucosaminas se trababan de un modo atípico. Los átomos de carbono de los componentes glucídicos, lipídicos y proteínicos se numeran de acuerdo con las convenciones establecidas. En este caso, el carbono primero de una de las glucosaminas está unido al carbono sexto de la otra a través de un oxígeno, de tal manera que este átomo queda por encima de ambas glucosaminas, que es la configuración que se conoce como beta. En la mayoría de las parejas de glucosaminas unidas por un enlace de tipo beta, los átomos implicados en éste son el uno y el cuatro, o a veces el uno y el tres. Sin embargo, la unión entre los carbonos uno y seis era hasta entonces desconocida.

Posteriormente, uno de nosotros (Rietschel) y Sumihiro Hase, que trabajaba con Westphal y Lüderitz, demostramos que el mismo enlace beta 1-6 entre glucosaminas se encontraba en muchas bacterias gramnegativas. Hoy es algo bien sabido que esta disposición constituye un rasgo característico y privativo de la mayoría de las bacterias gramnegativas.

Costó más establecer el modo de unión entre ácidos grasos y glucosaminas, y en ello intervinieron Ulrich

Zähringer, Uhlrich Seydel y Rietschel de Borstel, hasta conseguir descifrar en 1983 la estructura completa del lípido A de *E. coli.*

Simultáneamente, Nilofer Qureshi y Kuni Takayama, de la Universidad de Wisconsin, determinaron la organización estructural del lípido en la *Salmonella typhimurium* (una de las causas de diarrea). Resultó ser idéntico al del *E. coli.* En otras bacterias, varían la longitud de las cadenas de los ácidos grasos y los lugares de unión de éstos. Al menos las endotoxinas procedentes de bacterias patógenas gramnegativas incluyen en su estructura, junto con las glucosaminas fosforiladas, cuatro ácidos grasos que llevan un grupo hidroxilo (OH) en su carbono número tres, así como uno o dos ácidos grasos sin hidroxilar. En algunos casos, la glucosamina puede estar sustituida por una forma poco corriente de ella, la 3-amino glucosamina.

A medida que progresaban los trabajos estructurales, se acumulaban las pruebas que apoyaban la idea de un lípido A responsable, a la vez, de las alteraciones producidas por las endotoxinas, así como del refuerzo de la inmunidad. En 1954, Westphal y Lüderitz habían sugerido ya esa posibilidad al conocerse la variabilidad del polisacárido, excesiva para provocar un conjunto coherente de efectos.

Esta deducción recibió un nuevo impulso en las postrimerías de los sesenta, cuando Yoon B. Kim y Dennis W. Watson, de la Universidad de Minnesota, y otros grupos establecieron que las endotoxinas constituidas sólo por lípido A y Kdo eran tan tóxicas y pirogénicas como las moléculas que incluían un polisacárido entero. Quedaba así demostrado que la cadena O-específica y regiones amplias del núcleo de la molécula no eran necesarias para la toxicidad ni para la inducción de la fiebre.

Pero la prueba final sobre la potencia del lípido se retrasó hasta 1984, cuando Tetsuo Shiba y Shoichi Kusumoto y sus colaboradores en la Universidad de Osaka consiguieron la síntesis química del lípido A de *E. coli* y lo pusieron a nuestra disposición. Nuestro grupo y el de Lüderitz y Christos Galanos, del Instituto Max Planck de Friburgo, demostramos que la versión sintética del lípido A tenía exactamente las mismas propiedades que el lípido A natural. Cuando se inyectó en los animales, produjo una activación generalizada del sistema inmunitario, fiebre elevada y choque letal. Tres grupos japoneses obtuvieron por su cuenta resultados semejantes.

La consecución de la síntesis del lípido A de *E. coli* y la demostración de la identidad, química y biológica, con su equivalente natural dieron por concluido el capítulo dedicado a la investigación encaminada a determinar la naturaleza del componente endotóxico del lipopolisacárido. Sin embargo, debido a la complejidad estructural del lípido A, seguía abierta la posibilidad de que alguna fracción del lípido, más que la estructura completa, fuese la responsable de su actividad en el organismo.

Con el objeto de identificar el fragmento esencial, el grupo de los autores del artículo y el de Hans-Dieter Flad estudiaron en nuestro instituto el efecto de diversos derivados sintéticos del lípido A de *E. coli* en células cultivadas y en animales. Inyectamos el compuesto en el que estaba presente sólo una de las dos glucosaminas unida a los ácidos grasos normales y al fosfato. Sometimos a prueba los compuestos con parejas de glucosaminas, pero con un número mayor o menor de ácidos grasos que el que suele encontrarse en la molécula, o con una disposición diferente de los ácidos grasos normales.

Nos sorprendió mucho ver que, aunque algunos compuestos desarrollaban cierta actividad, ninguno superaba, en potencia, al lípido A nativo. Tomados en conjunto, los datos nos dicen que, a pesar de su complejidad, se necesita que el componente lipídico conserve su integridad para conseguir el óptimo de la actividad. Esta se ve recortada cuando se utiliza sólo una parte de su estructura. Al parecer, los diversos componentes —azúcares, fosfatos y ácidos grasos— se unen entre sí y conforman una estructura tridimensional que facilita su interacción con la célula huésped.

Con los datos estructurales acumulados hasta la fecha no podemos afirmar de manera tajante qué interacciones moleculares condicionan la respuesta del huésped frente al lípido A. Ello no obstante, la investigación empieza a cosechar información pormenorizada sobre la forma en que las endotoxinas producen sus efectos.

Sabemos ya, por ejemplo, que las endotoxinas permanecen inactivas si no se liberan de la superficie bacteriana. Quedan libres, como Pfeiffer descubrió a principios del siglo pasado, cuando la célula bacteriana muere, y no sólo entonces, sino también cuando la bacteria se multiplica. Algunas bacterias se multiplican en el interior de células huésped, otras fuera de ellas. Al parecer, las endotoxinas producidas por las bacterias pertenecientes al primer grupo deben liberarse de las células infectadas para que su efecto se ponga de manifiesto.

Una vez que las endotoxinas se encuentran libres para actuar, no lo hacen según lo esperado: matando o provocando directamente otras respuestas, y así no producen la fiebre porque se unan a las células de los centros cerebrales reguladores de la temperatura. Antes bien, activan determinadas células del huésped y les instan a que segreguen moléculas que hacen el papel de mediadores. (Idea que ya propuso el patólogo de origen ruso Valy Menkin a finales de los años cuarenta, cuando se encontraba en la Universidad de Temple.) Estos mediadores actúan entonces localmente, viajan por la sangre o ambas cosas, desecadenando respuestas dispares.

Los trabajos acometidos por el equipo de Stephan E. Mergenhagen, del Instituto Nacional de Investigaciones Odontológicas, y el de Galanos demostraron que los macrófagos eran los principales afectados en el proceso de activación. Estas células defensivas se dedican a atrapar y destruir toda substancia que pueda ser dañina para el organismo. Cuando se activan, segregan muchas moléculas diferentes que operan de manera concertada, secuencial o independientemente, para instigar o reforzar las respuestas inmunitarias, tanto específicas como inespecíficas, contra un invasor. (Los componentes inespecíficos del sistema inmunitario, como macrófagos, granulocitos y moléculas del complemento, atacan una amplia gama de invasores.) Algunos macrófagos circulan por la sangre; otros residen en los tejidos.

El trabajo de varios laboratorios ha puesto de manifiesto que una pequeña proteína, el factor de necrosis tumoral, es uno de los mediadores principales de las endotoxinas sintetizados por los macrófagos. Por sí mismo, el factor de necrosis tumoral inyectado despierta respuestas que se asemejan a las que se atribuyen a las endotoxinas, incluida la fiebre; si las dosis son suficientemente altas provocan el choque irreversible y la muerte. Si atendemos a su cara favorable, y como su mismo nombre indica, el factor de necrosis tumoral puede servir de cebo de diversas células defensivas que se ven atraídas hacía los sitios de infección y destruir las células tumorales.

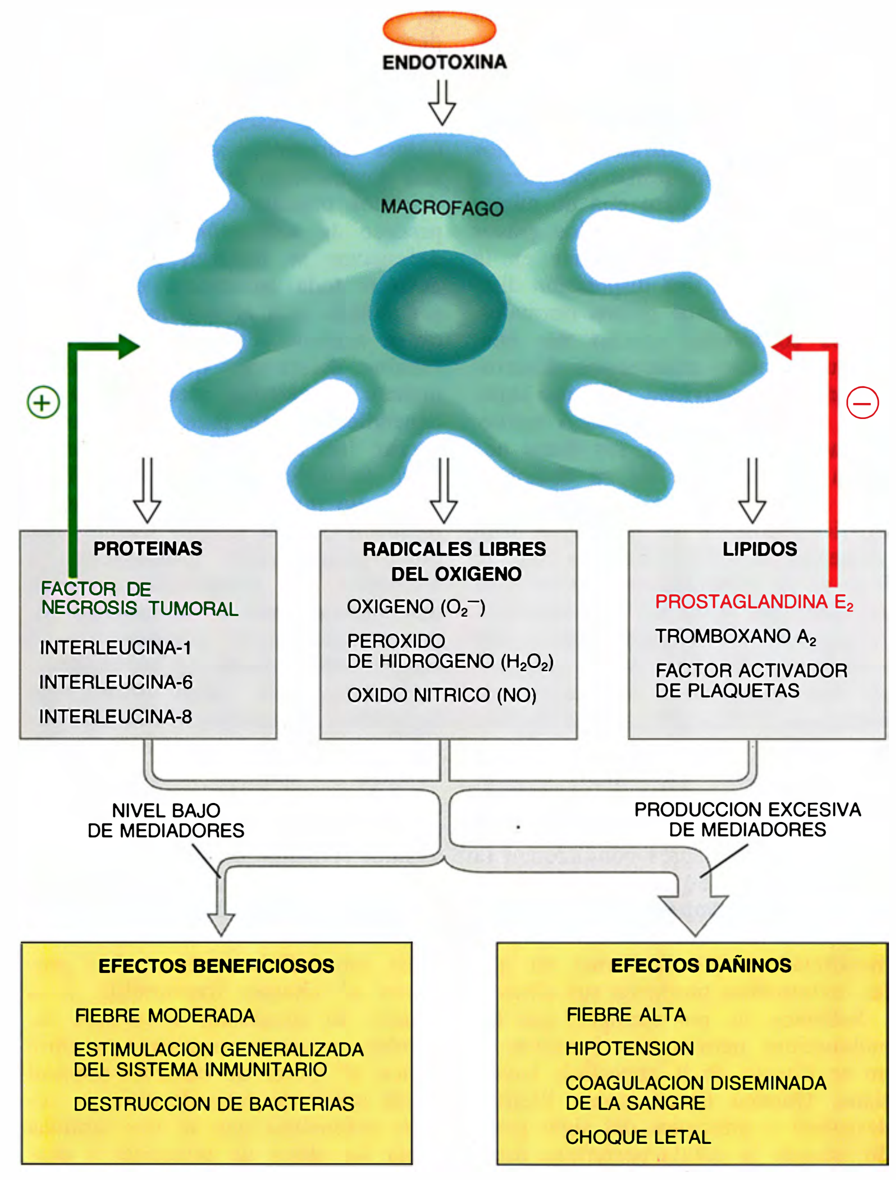
Más recientemente, se ha demostrado que los macrófagos estimulados por las endotoxinas producen las proteínas interleucina-1, interleucina-6 e interleucina-8, que ejercen mu-

chos de los mismos efectos que el factor de necrosis tumoral. Los macrófagos activados liberan también diversos lípidos (algunos de los cuales contribuyen a la fiebre y regulan la actividad del sistema inmunitario), y forman radicales libres, que son compuestos oxigenados extremadamente reactivos. En el interior de los macrófagos, o sobre su superficie, los radicales libres contribuyen a la destrucción bacteriana.

Así pues, parece que, cuando una bacteria gramnegativa invade un tejido y libera allí mismo cantidades moderadas de endotoxina, todo este conjunto de productos de los macrófagos facilita la erradicación de la infección, generando una respuesta inmunitaria local y controlada. Los efectos típicos —fiebre moderada, movilización de componentes inmunitarios tanto específicos contra microbios como de otros menos especializados— ayudan a la recuperación y también a la protección contra nuevas invasiones bacterianas.

Cuando se agrava la infección y se acumula abundante cantidad de endotoxina en el torrente sanguíneo, estableciendo contacto con macrófagos de todo el organismo, la liberación sistémica de potentes mediadores puede producir un choque que represente una amenaza para la vida; con el fallo circulatorio se resiente el funcionamiento normal de las células, que acaban por morir. Las endotoxinas penetran sin dificultad, y por sí solas, en la circulación a través del tejido alterado. Pero los efectos letales suelen producirse cuando son las bacterias las que se abren camino hasta la sangre, medio en que se multiplican con rapidez; en el proceso se liberan ingentes cantidades de toxina que actúa sobre los macrófagos.

Las endotoxinas no son, por tanto, intrínsecamente tóxicas; su efecto depende de la respuesta del huésped. Como Lewis Thomas señaló en *The Lives of a Cell*, es el comportamiento aplastante, incontrolado y autodestructivo del huésped el responsable de que las toxinas se tornen ponzoñosas. “Nuestros tejidos, escribió, interpretan la llegada de las endotoxinas como la peor de las noticias. Cuando detectamos la presencia del lipopolisacárido, es probable que acudamos a cualquier tipo de defensa a nuestro alcance; bombardearemos, exfoliaremos, bloquearemos, precintaremos y destruiremos todos los tejidos del área... Todo esto parece innecesario, una consecuencia del pánico.”



3. LAS ENDOTOXINAS ACTIVAN LOS MACROFAGOS y les instan a que produzcan tres grupos de potentes mediadores —proteínas, radicales libres del oxígeno y lípidos—. Estos mediadores, que pueden actuar independientemente, de manera conjunta o de manera secuencial, provocan diversos efectos (*recuadros dorados*). Además de sus otras funciones, el factor de necrosis tumoral multiplica la síntesis de mediadores (*flecha verde*); la prostaglandina E_2 inhibe esa síntesis (*flecha roja*).

Para entender la razón de semejante pánico, conviene conocer la entrada en acción de los macrófagos. La investigación ve con creciente claridad que, en la sangre, las endotoxinas se unen a la proteína ligadora del lipopolisacárido (PLL), una molécula circulante. Samuel D. Wright, adscrito a la Universidad Rockefeller, y el grupo de Richard J. Ulevitch y Peter S. Tobias, de la Fundación y Clínica Scripps en La Jolla, han demostrado que el complejo lipopolisacárido-PLL se ancla en un receptor de la superficie de los macrófagos, el que se conoce con el nombre de CD14. Este hallazgo convierte a las endotoxinas en las únicas substancias que interaccionan con un receptor después de formar primero un complejo con una proteína circulante.

Lo que está menos claro es si la unión del complejo al CD14 es todo lo que se necesita para incitar la producción de mediadores por los macrófagos. Podría suceder que la unión al CD14 facilitara la interacción entre endotoxinas y un receptor diferente, que solo o en colaboración con los CD14 estimulara los macrófagos. Existen datos que abonan esa idea. Así, David C. Morrison, de la Universidad de Kansas, y otros han identificado las moléculas situadas en la superficie de los macrófagos

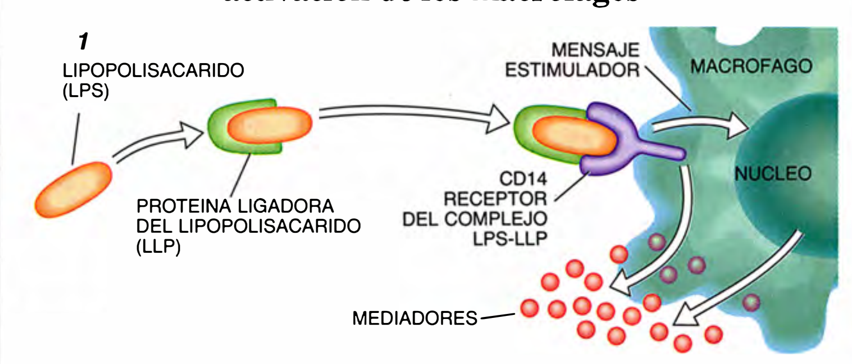
que se unen directamente a las endotoxinas, y más concretamente con la porción correspondiente al lípido A. Los receptores pueden captar endotoxinas después de que éstas se hayan unido a la proteína ligadora de lipopolisacáridos y al CD14, aunque también es posible que las endotoxinas activen por sí mismas ciertos receptores de los macrófagos de la sangre o de los tejidos.

Con el interés creciente por las interacciones entre endotoxinas y macrófagos, brotan ideas nuevas acerca de cómo impedir ese acoplamiento en caso de infecciones graves de gérmenes gramnegativos. Algunos investigan la razón de que los fragmentos del lípido A, no tóxicos, o menos tóxicos que la forma entera de éste, bloqueen la capacidad productora de mediadores que posee el lípido íntegro. Muy posiblemente, el fragmento del lípido se una a los receptores de los macrófagos y obstaculice así el acceso de las endotoxinas intactas. Se está ya comprobando, en animales, el grado de eficacia de las estructuras parciales.

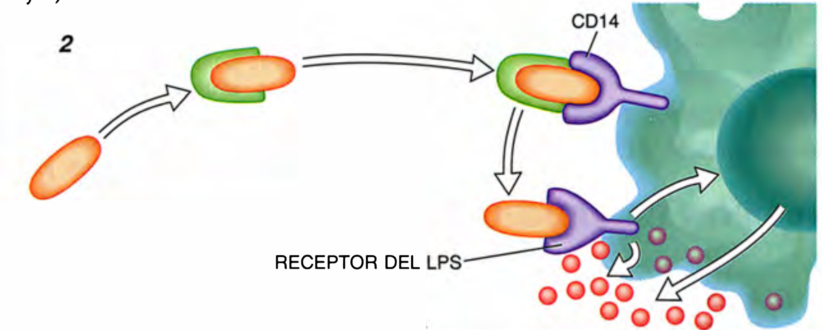
Estructuras parciales del lípido A, o versiones modificadas de éste, podrían revestir el mayor interés a la hora de estimular la inmunidad general de pacientes con pobres defensas naturales frente a infecciones o tumores. Tal vez estructuras seleccionadas den lugar a mezclas poco corrientes de mediadores, de modo que se produzcan sólo efectos deseables, como pueden ser la estimulación de la inmunidad inespecífica o la destrucción de tumores, sin que aparezcan las complicaciones del choque.

El descubrimiento de que los mediadores derivados del huésped se hallan detrás de la sintomatología mueve a imaginar nuevos enfoques terapéuticos. Podría, por ejemplo, bloquearse la actividad o la síntesis de los mediadores, o la de los receptores a través de los cuales influyen sobre neuronas o las células de los vasos sanguíneos entre muchas otras. F. Ulrich Schade y Peter Zabel, de Borstel, han visto que las substancias que inhiben la producción del factor de necrosis tumoral, o que suprimen la acción del factor de necrosis tumoral ya sintetizado, evitan que las endotoxinas produzcan fiebre en voluntarios, o la muerte de los animales.

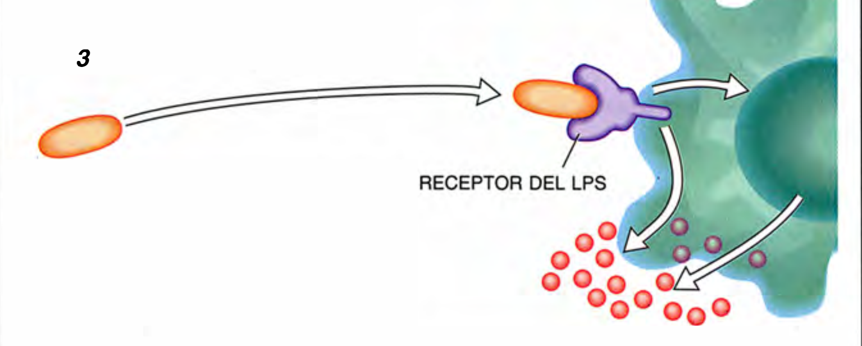
Tres vías posibles a seguir por las endotoxinas en su activación de los macrófagos



El lipopolisacárido (LPS) (*naranja*), otro nombre de la endotoxina, se une a la proteína ligadora del lipopolisacárido (LLP) (*verde*) en la sangre. El complejo activa entonces un receptor que se conoce como CD14, que pasa instrucciones a los macrófagos para que produzcan mediadores (*esferas rojas*).



En esa misión productora de mediadores, es posible también que el CD14 no emita ninguna señal y en cambio capacite al LPS para activar un segundo receptor.



Cabe, por último, que el LPS active directamente ciertos receptores sin la ayuda de LLP o de CD14.

La atención prestada a la síntesis bacteriana de endotoxinas ha traído nuevas ideas para el tratamiento de los enfermos. Las bacterias gramnegativas podrían sintetizar endotoxinas exclusivamente para producir malestar y amenazar el organismo invadido, aunque tenemos serias dudas de que las cosas sean así. Las bacterias productoras de endotoxinas aparecieron antes de que llegaran los organismos superiores y sensibles; dicho de otro modo: las moléculas no se originarían para provocar la enfermedad, sino por otras razones. Además, las bacterias no sacan ningún provecho del daño, parcial o letal, que induzcan en el huésped.

Lo más probable es que los microorganismos gramnegativos sinteticen las endotoxinas sencillamente porque las necesitan. Al parecer, las bacterias las precisan para reproducirse; no se sabe de ninguna bacteria gramnegativa que carezca de tales moléculas y se reproduzca bien, ni en el tubo de ensayo ni en su ambiente natural. Además, las bacterias gramnegativas cuentan con ellas para protegerse de agresiones externas, como se desprende de los análisis estructurales.

Las mediciones y cálculos realizados por Manfred Kastowsky, de la Universidad de Berlín, y Harald La-

bischinski, del también berlinés Instituto Robert Koch, sugieren que el lípido A de *E. coli* se asemeja a un conjunto de cilindros que resuenan al moverse con el viento. Los "tubos musicales" (los ácidos grasos), incrustados en la membrana externa de la bacteria, guardan entre sí una orientación paralela y perpendicular al plano de la membrana. La "placa" de la que cuelgan (el par de glucosaminas fosforiladas) está ligeramente inclinada con un ángulo de 45 grados con respecto a la membrana. En esta disposición, los ácidos grasos forman cables hexagonales que están estrechamente empaquetados junto a otros cables de la membrana.

Basta una estructura tan rígida y ordenada para explicar por qué las bacterias gramnegativas son menos permeables que las membranas propias de las células humanas o de las bacterias grampositivas, ricas en fosfolípidos y mucho más fluidas. Como señaló Hiroshi Nikaido, de la Universidad de California en Berkeley, la falta de permeabilidad justificaría la incapacidad, mostrada por muchos antibióticos que destruyen las bacterias grampositivas, de penetrar en las especies gramnegativas; si lo consiguen, es a dosis muy elevadas. Los fármacos que atentan contra la arquitectura de las endotoxinas ayudarán, por tanto, a destruir las bacterias y hacerlas más vulnerables a los antibióticos.

En Estados Unidos y en Suecia hay grupos que buscan la inhibición de la síntesis del lípido A para impedir la reproducción de la cepa bacteriana. Y se han conseguido a ese respecto análogos del Kdo, que suele agregarse a un precursor del lípido A antes de que se unan los ácidos grasos del lípido. Los análogos inhiben la actividad de una enzima necesaria para la síntesis de este azúcar. Cuando la bacteria se encuentra con tales impostores se ve incapacitada para llevar a término la síntesis completa del lípido A y del lipopolisacárido. En consecuencia, deja de crecer.

Siendo el Kdo un requisito para todas las bacterias gramnegativas, cabe esperar que sus análogos afecten al grupo entero de las mismas. Estos análogos se distinguirían también por otro motivo. Ninguno de los fármacos hasta ahora utilizados actúa interrumpiendo la síntesis de las endotoxinas; de ahí que los análogos constituirían una nueva clase de antibióticos.

También pueden surgir nuevas terapias del estudio del mecanismo en virtud del cual la infección con una bacteria gramnegativa estimula el sistema inmunitario en su lucha contra otras especies gramnegativas. Recuérdese que en todos estos microorganismos están presentes parejas de glucosaminas unidas a Kdo. Es de esperar que, en nuestro organismo, estas regiones conservadas estimulen la producción de anticuerpos que reconozcan los mismos segmentos de cualquiera de las bacterias pertenecientes a esa clase. Fármacos compuestos por tales anticuerpos podrían aportar un par de ventajas importantes.

Podrían reforzar la respuesta inmunitaria específica desencadenada por la cadena O-específica. No debe olvidarse, además, que la resistencia de las bacterias gramnegativas a los antibióticos disponibles en el mercado crece con la difusión de cepas mutantes y capaces de sortearlos. Los anticuerpos suscitados contra una región esencial conservada, que no puede cambiar sin que se ponga en peligro la supervivencia bacteriana, podría muy bien resolver el problema de la resistencia. Son muchos los laboratorios, de todo el mundo, empeñados en desarrollar ese compuesto de tan amplio espectro.

El avance registrado débese al esfuerzo de expertos de origen muy dispar: químicos, físicos, microbiólogos, genéticos, biólogos, inmunólogos, patólogos, farmacólogos y clínicos. Esa convergencia plural se impone si queremos conocer mejor la función de las endotoxinas en las bacterias, el mecanismo mediante el cual las toxinas activan los macrófagos e inducen la producción de mediadores, y el desarrollo de nuevas medicinas. Con ese fin se fundó, en 1987, la Sociedad Internacional para el Estudio de las Endotoxinas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GRAM-NEGATIVE ENDOTOXIN: AN EXTRAORDINARY LIPID WITH PROFOUND EFECTS ON EUKARYOTIC SIGNAL TRANSDUCTION. C. R. H. Raetz, R. J. Ulevitch, S. D. Wright, C. H. Sibley, A. Ding y C. F. Nathan en *FASEB Journal*, vol. 5, n.º 12, págs. 2652-2660; septiembre de 1991.

BACTERIAL ENDOTOXIN: MOLECULAR RELATIONSHIPS BETWEEN STRUCTURE AND ACTIVITY. E. Th. Rietschel *et al.* en *Infectious Disease Clinics of North America*, número especial dedicado al tema *Gram-Negative Septicemia and Septic Shock*, vol. 5, n.º 4, págs. 753-779; diciembre de 1991.

BACTERIAL ENDOTOXIC LIPOPOLYSACCARIDES: VOL. I: MOLECULAR BIOCHEMISTRY AND CELLULAR BIOLOGY; VOL. II: IMMUNOPHARMACOLOGY AND PATHOPHYSIOLOGY. Dirigido por David C. Morrison y John L. Ryan. CRC Press, 1992.

Cosmología: teorías y observaciones

El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo en microondas fundamentó en los años sesenta la teoría de la gran explosión y convirtió en ciencia empírica la cosmología

Stephen G. Brush

¿Tuvo el universo un comienzo o ha existido siempre? Por largo tiempo la ciencia pensó que la cuestión no iba con ella y la reputó exclusiva del ámbito metafísico de filósofos y teólogos. Hubo que esperar a mediados de nuestro siglo para que físicos y astrónomos empezaran a equiparse con teorías y técnicas experimentales cuyo alcance y grado de precisión les permitieran abordar el problema.

Dos cosmologías compitieron entonces en dar la respuesta. Una de ellas, popularmente llamada la gran explosión ("big bang"), supone que el universo evolucionó desde condiciones iniciales de calor y densidad tan extremados que sólo podían existir en él la radiación y las partículas elementales; más tarde, el universo se expandió y se enfrió, formándose por condensación las estrellas y las galaxias. El modelo contrapuesto presenta un universo que existe desde siempre, en el que la dispersión de materia resultante de la observada expansión del universo está compensada por la continua creación de materia.

La teoría de la gran explosión ha prevalecido, debido en buena medida a la predicción, observación e interpretación de la radiación cósmica de fondo, fenómeno que suele considerarse el aura crepuscular de la gran explosión y que inunda el cielo en todas las direcciones, en las frecuencias de microondas. Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los Laboratorios Bell, descubrieron dicha radiación cósmica en 1964-65, al intentar suprimir el ruido de microondas en su antena de radio. El modelo de universo estacionario no predice una tal radiación, ni puede explicarla de manera plausible. Así, por primera vez, las hipótesis acerca del origen del cosmos se enfrentaron a una prueba empírica, que una ganó y perdió la otra.

Raramente las teorías se mantienen o desechan de resultas de una sola prueba. Esta vez, sin embargo, el cambio de opinión fue casi inmediato: en pocos años, la mayoría de los cosmólogos habían adoptado la teoría de la gran explosión o habían dejado de publicar en aquel campo. En 1978, Penzias y Wilson obtuvieron el premio Nobel de física por su valioso descubrimiento. Justamente el pasado abril, la medición de minúsculas variaciones en la radiación de fondo permitía vindicar otra predicción de esta teoría.

No obstante, nadie hubiera sido capaz de apreciar la significación del fondo cósmico de microondas sin la base de conocimientos constituida por muchos otros científicos a lo largo del siglo. La historia del descubrimiento nos ofrece otro tipo de análisis: remontándonos más atrás de 1965 podemos ver cómo afectó dicho hallazgo a la situación de las teorías cosmológicas rivales, y así contrastar conceptos enfrentados sobre la naturaleza del progreso científico.

La cosmología de la gran explosión empezó a perfilarse en los años treinta, una vez que Edwin P. Hubble, eminente astrónomo americano, demostró que las galaxias parecen separarse unas de otras, y que las más alejadas se distancian con mayor velocidad. El hallazgo de Hubble implicaba que el universo está en expansión, y también se interpretó como prueba de que alguna vez el cosmos había estado concentrado en un espacio muy pequeño, en un determinado instante. Tanto Alexander A. Friedman, físico ruso, como Georges Lemaître, sacerdote belga, utilizaron la teoría general de la relatividad de Albert Einstein para describir



1. LOS OYENTES COSMICOS Arno A. Penzias (*izquierda*) y Robert W. Wilson (*derecha*), de los Laboratorios Bell, posan ante la antena de bocina de microondas que por primera vez prestó oídos a la gran explosión.

STEPHEN G. BRUSH enseña historia de la ciencia en el College Park de la Universidad de Maryland desde 1968, tras haber investigado en física teórica en el Laboratorio Lawrence en Livermore y colaborado en la redacción de un manual universitario de Harvard. Ha escrito sobre la teoría cinética de los gases, el origen del sistema solar y otros temas de la historia de la ciencia física moderna. Estudia ahora el peso de las pruebas empíricas en la elección de las teorías por parte de los científicos.

cómo podría evolucionar un universo en expansión de este género.

Los físicos nucleares desempeñaron cierto papel proporcionando herramientas para modelar la síntesis de elementos a partir de partículas fundamentales. Tales herramientas sirvieron no solamente a George Gamow, máximo paladín de la gran explosión, y a sus colaboradores Ralph A. Alpher y Robert Herman, sino también a Fred Hoyle, por entonces en la Universidad de Cambridge, quien apoyó la teoría rival del estado estacionario.

Para el trabajo teórico fue esencial la contribución aportada por Einstein y Max Planck hacia principios de siglo, al establecer la física de la radiación del cuerpo negro. El cuerpo negro debe su nombre a su idealizada propiedad de absorber toda la radiación que sobre él incide y de volver a radiarla después. Esta energía nuevamente radiada se distribuye en el espectro con una configuración muy característica, que Planck explicó. Debido a que la bola de fuego primigenia, en sus fases más tempranas, habría colocado la energía y la materia en un equilibrio térmico perfecto, la primera radiación liberada por la explosión enfriante tendría que haber presentado la distribución del cuerpo negro.

Quedaba por realizar el cálculo preciso del nivel energético que hoy día poseería dicha distribución espectral, transcurridos miles de millones de años desde que la bola de fuego empezara a expandirse y a enfriarse. ¿Cuál era la temperatura de la radiación en el espacio? Esta pregunta sólo hallaría respuesta tras haber elaborado los científicos una teoría cuantitativa de la evolución que siguió a la gran explosión.

El desarrollo de esta teoría cuantitativa lo inició Gamow, un físico nacido en Rusia que había labrado su reputación explicando la desintegración radiactiva. En los años treinta se fue a los EE.UU, contratado primero por la Universidad George Washington y, después, por la de Colorado. En la George Washington se concentró en los aspectos astrofísicos y cosmológicos de las reacciones nucleares, sobre todo en los mecanismos por los que se habían sintetizado los primeros elementos.

Gamow buscó la respuesta en los

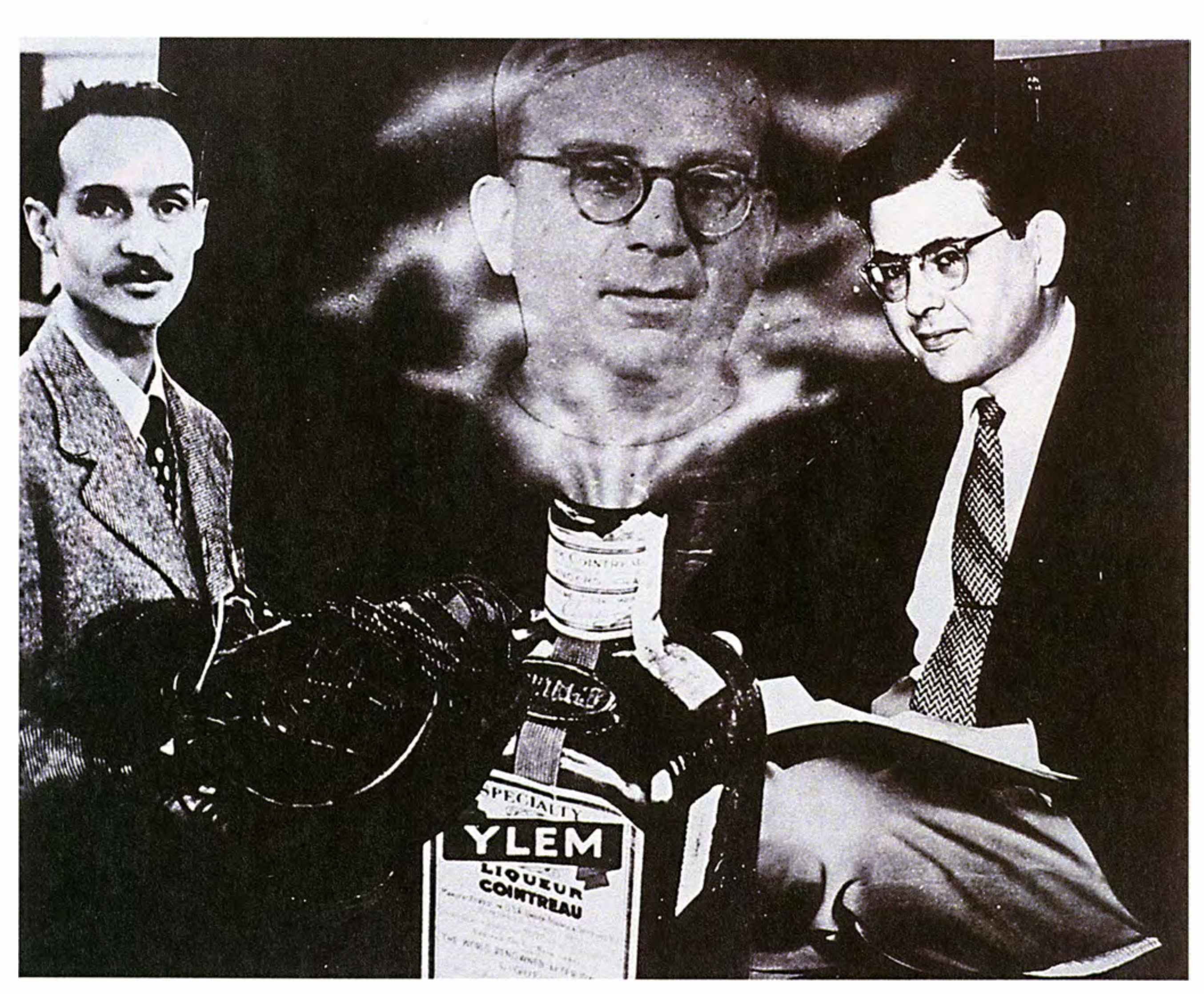


dos extremos de la escala cósmica. A comienzos de la década de los treinta, los astrónomos demostraron que la mayoría de las estrellas estaban predominantemente compuestas de hidrógeno y helio. Era, pues, razonable suponer que el hidrógeno había sido el primer elemento en formarse, puesto que su núcleo no contiene más que un solo protón, y que el helio, el siguiente elemento más pesado cuyo núcleo contiene dos protones y dos neutrones, fue el primer elemento "superior" formado por la fusión del hidrógeno. Sin embargo, los protones sólo se fusionan si alguna fuerza vence la inmensa repulsión electrostática que existe entre ellos; este proceso parecía exigir tanto calor y tanta presión que sólo un suceso primordial, o el interior de una estrella, podría haber aportado las condiciones adecuadas.

La teoría de la física nuclear de las estrellas entonces imperante, que en su mayor parte se mantiene hoy válida, fue desarrollada en 1938 por el físico de origen alemán Hans Bethe, de la Universidad de Cornell. Bethe deseaba explicar el brillo del Sol. Para ello supuso que la fusión nuclear en los interiores estelares convertía masa en energía. En concreto, sugirió que en las estrellas del tipo solar podían verificarse dos reacciones de fusión: en una, los protones se fusionan para formar núcleos de helio y, en la otra, se añaden protones a los núcleos de carbono para obtener elementos más pesados.

Pero, ¿dónde se originó el carbono? Esta pregunta no tuvo respuesta hasta los años cincuenta, cuando Hoyle propuso una reacción capaz de producir carbono a partir de tres núcleos de helio, en las especiales condiciones que reinan en el núcleo de una estrella. Esta reacción, y otras que son necesarias para crear los elementos más pesados, tuvieron confirmación experimental en un acelerador de partículas de alta energía por William A. Fowler y su grupo, en el Instituto de Tecnología de California (Caltech), contribuyendo Hoyle y E. E. Salpeter con importante ayuda teórica. En 1957, Fowler, Hoyle y Margaret Burbidge, del Caltech, junto con Geoffrey Burbidge, que por entonces trabajaba en los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, habían elaborado un guión explicativo de la síntesis estelar, a partir de hidrógeno y helio, de la mayoría de los elementos. Dicho trabajo había sido desarrollado, independientemente, por A. G. W. Cameron, entonces en la Energía Atómica del Canadá. Pese a todo, la abundancia cósmica del helio seguía siendo un misterio.

Gamow había formulado ya una audaz hipótesis que finalmente condujo a resolver el problema del he-



2. EN SERIO Y EN BROMA: en un montaje realizado para divertir a los amigos, George Gamow emerge de una botella de materia primigenia creada en la gran explosión, como un genio conjurado por Robert Herman y Ralph A. Alpher, quienes demostraron que tal materia, a la que llamaron "ylem", podría haberse combinado para formar los elementos ligeros.

lio. En su versión de la gran explosión, Gamow sugirió que los elementos podían haberse formado incluso antes de que aparecieran las estrellas, en un gas de neutrones increíblemente caliente y denso. Después, algunos de los neutrones se habrían desintegrado en protones y electrones, bloques constitutivos del hidrógeno. En 1948 Gamow, famoso por su impaciencia con los detalles así como por su brillantez, encargó la labor de desarrollar la teoría a Ralph Alpher, estudiante graduado de la George Washington, quien más tarde uniría su esfuerzo al de Robert Herman, del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins. Alpher llamó "ylem" a la sustancia inicial de Gamow, recurriendo al término griego clásico que significa "materia primordial".

Dos teorías cosmológicas y sus predicciones

	TEMPERATURA DEL ESPACIO	EDAD DEL UNIVERSO	CREACION DE MATERIA	FORMACION DE LOS ELEMENTOS
GRAN EXPLOSION	Inicialmente muy alta; ahora algunos grados sobre el cero absoluto	Dos mil millones de años (versión de 1950); de 10.000 a 20.000 millones de años (estimación actual)	Toda de una vez	Justo después de la gran explosión
ESTADO ESTACIONARIO	Cero (no hay radiación)	Infinita	Continua	Continuamente en las estrellas

Según la teoría de Gamow, tal como la elaboraron Alpher y Herman, los núcleos mayores se formaron cuando los más pequeños, empezando por el hidrógeno, fueron creciendo mediante la captura sucesiva de neutrones. El proceso continuó hasta que se agotó el suministro de neutrones libres, bajó la temperatura y las partículas se dispersaron. Hoyle trató de ridiculizar esta nueva tesis que se oponía a la suya del universo estacionario, llamándola "teoría de la gran explosión". Sin embargo, el tiro le salió por la culata: la frase era tan gráfica que la tomaron por propia los defensores de la nueva teoría.

Alpher y Herman se dieron cuenta en seguida de que la radiación que invadía su modelo de universo mantendría, a lo largo del proceso de enfriamiento, el espectro de una fuente de cuerpo negro. Además, podían calcular en qué grado la expansión del universo habría atenuado esta radiación y reducido su temperatura. Ambos físicos utilizaron las estimaciones de la densidad actual de la materia en el universo para predecir la temperatura que hoy alcanza la radiación cósmica de fondo, obteniendo así un valor de unos cinco kelvins (grados por encima del cero absoluto).

Los astrónomos no se apresuraron a confirmar esa predicción, tal vez porque no sabían cómo separar dicha radiación de fondo de otras fuentes radiantes, o quizá porque no se tomaban en serio la cosmología en la que tal predicción se apoyaba. En su versión original, la teoría de la gran explosión presentaba dos graves inconvenientes. En primer lugar, era incapaz de explicar la formación de los elementos más allá del helio, cuyo número másico es cuatro; como no existen isótopos estables de número másico cinco y ocho, no es posible formar elementos más pesados a partir de helio por adición de neutrones, uno a uno. Este problema sólo podía resolverse recurriendo a la nucleosíntesis estelar de Hoyle, Fowler y sus colaboradores, concepto asociado a la teoría del estado estacionario. En realidad, la versión moderna de la teoría de la gran explosión supone que los elementos superiores al helio solamente aparecen tras la formación de la primera generación de estrellas.

La segunda objeción al universo de la gran explosión se refería al problema de la edad. De las mediciones astronómicas de las distancias y las velocidades de recesión de las galaxias, juntamente con la ley de expansión de Hubble, resultaba que el universo tenía una edad de dos mil millones de años, mientras que las rocas de la superficie de la Tierra demuestran que este planeta es considerablemente más antiguo.

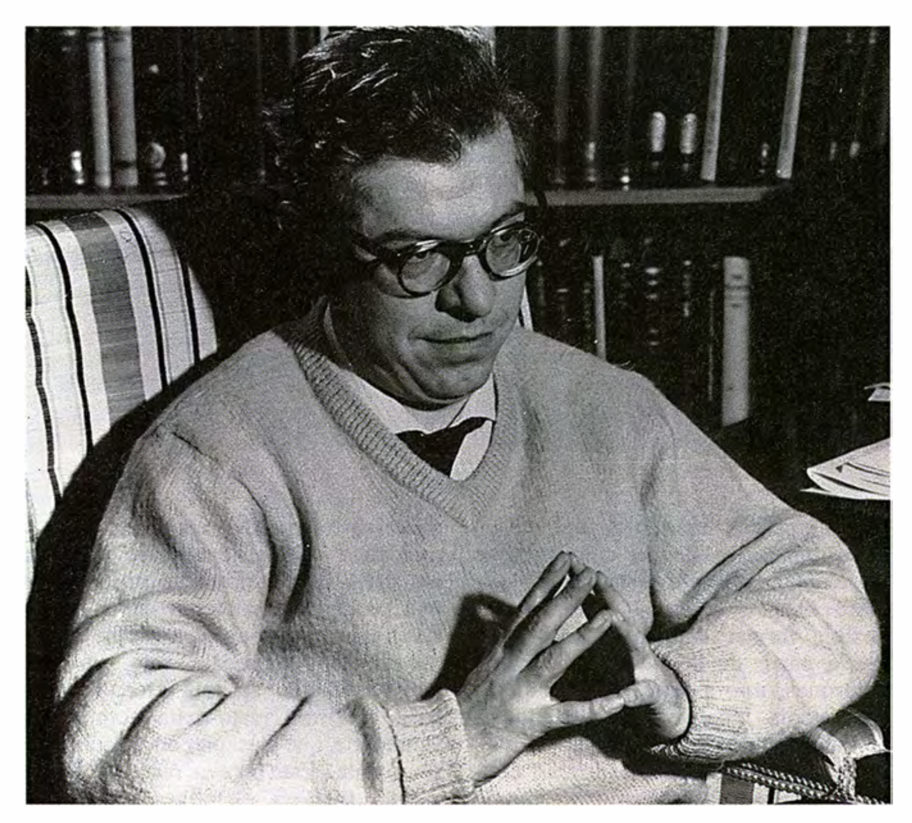
La teoría del estado estacionario fue concebida para resolver esta aparente contradicción. Una noche de 1946 en Cambridge, Inglaterra, tres jóvenes científicos, Hoyle, Hermann Bondi y Thomas Gold, fueron a ver una película de fantasmas, "The Dead of Night". Como Hoyle recordó más tarde, la película "tenía cuatro partes separadas, ingeniosamente montadas de tal manera que el final era idéntico al principio, convirtiéndose en un círculo". Gold preguntó a sus amigos si el universo podría estar construido de modo similar. En el debate posterior, estos amigos esbozaron un modelo de universo dinámico, pero no cíclico, que siempre pareciera el mismo aunque estuviera en perpetuo cambio.

Según Hoyle, Bondi y Gold, el universo nunca tuvo comienzo. Argumentaban que el hecho de alejarse las galaxias de nosotros no implica una continua atenuación de la materia: según ellos, nuestra propia galaxia nunca se quedará sola, ya que constantemente se está creando materia al ritmo justo para compensar la materia que desaparece del universo visible. Esta nueva materia, finalmente, formará estrellas y galaxias, de manera que el universo siempre parecerá el mismo para cualquier observador, en cualquier instante de tiempo.

Se puede objetar que la creación de materia a partir de la nada viola la ley de la conservación de la masa y la energía. La respuesta es obvia: la gran explosión también viola esta ley, al aceptar que toda la materia se crea de una vez, al inicio del tiempo, cuando el suceso cae fuera del alcance del estudio científico. (En una versión posterior de la teoría del estado estacionario, Hoyle afirmó que es la energía gravitacional la que crea materia, refinamiento que restablece la conservación global de masa y energía pero introduce otros problemas.)

Los defensores del estado estacionario aseguraban que su teoría era más científica que la tesis de la gran explosión, por cuanto postulaba un proceso —la creación continua— capaz, en principio, de ser observado. Por otra parte, aducían, las predicciones formuladas eran definidas, de un tipo que los astrónomos podrían comprobar en un futuro próximo.

Al cifrar el éxito de su modelo en el resultado de un corto número de observaciones, Bondi, Gold y otros paladines del estado estacionario invocaban expresamente la doctrina de Karl Popper, filósofo de origen austriaco. Popper define la ciencia como disciplina basada en la formulación de hipótesis que predicen fenómenos, preferiblemente nuevos, susceptibles



3. SIR FRED HOYLE, paladín del universo estacionario, concibió esta teoría con Hermann Bondi y Thomas Gold en 1946, tras presenciar los tres una película de fantasmas que acababa con un retorno a la escena inicial.

de comprobación. Si una predicción falla, el científico abandona la hipótesis; si la hipótesis sobrevive, el científico no pretende haberla demostrado, sino sencillamente haberla establecido como base para futuras investigaciones.

El principio de Popper sostiene que debe ser la comprobabilidad, y no la veracidad, el criterio aplicable para juzgar las teorías científicas. Así, por ejemplo, Popper rechaza el marxismo y el psicoanálisis como "seudociencia", pues cree que estas teorías son tan flexibles que pueden explicar cualquier hecho y, por tanto, eludir cualquier comprobación.

Bondi propuso someter la teoría del estado estacionario a la prueba de comparar el universo en su estado actual con el universo que una vez existió. Dado que dicha teoría establece que el universo siempre parece el mismo, podía predecirse que las galaxias recientemente formadas se asemejarían a las que se constituyeron hace largo tiempo. Al observar regiones del espacio muy lejanas —por tanto muy anteriores en el tiempo, ya que la velocidad de la luz es finita—, y ver que las galaxias remotas eran diferentes de las cercanas, Bondi concluía que "entonces la teoría del estado estacionario está completamente muerta". Sin embargo, al igual que otros que escribían antes de 1965, Bondi dejó de mencionar otra prueba del modelo del estado estacionario: no predice la radiación cósmica de fondo en microondas.

La teoría incumplió la prueba que había preparado Bondi. En los años cincuenta y primeros de la década siguiente, diversas observaciones astronómicas indicaron que el universo había cambiado notablemente a lo largo del tiempo. Martin Ryle, de Cambridge, contó las fuentes de radio distantes y cercanas, sabiendo que las señales más alejadas habían tardado más en llegar y que por ello reflejaban una etapa anterior de la historia cósmica, y de ahí concluyó que habían existido menos fuentes en el pasado. Aunque ciertos astrónomos argumentaban que no había demostrado nada, aparecieron nuevas pruebas en apoyo suyo cuando se descubrieron las que parecían ser las fuentes radiantes más viejas: los objetos cuasiestelares, o cuásares, objetos que no tenían ningún tipo de equivalente contemporáneo.

Entre tanto, el difícil problema de la disparidad entre la edad del universo y la edad de la Tierra se resolvió de un modo que favorecía a la gran explosión. En 1952, siguiendo directrices de Walter Baade, del Observatorio de Monte Wilson, los astrónomos corrigieron al alza su escala de distancias galácticas en un factor dos, con lo cual se dobló la edad estimada del universo. Posteriores trabajos elevaron tal edad a un mínimo de diez mil millones de años, mientras que la de la Tierra se mantenía fija en 4500 millones de años.

Sin embargo, a numerosos físicos, especialmente en Gran Bretaña, les gustaba la simplicidad de la teoría del estado estacionario, y por ello seguían aferrados a esa idea. No veían, decían, la necesidad de lanzar hipótesis arbitrarias acerca de una gran explosión ni preocuparse de lo que pudiera suceder antes de la misma. Los defensores del modelo estacionario también se animaban con el fallo de anteriores intentos de refutación, historial que les llevaba a recelar nuevos ataques.

Mientras los partidarios del estado estacionario gastaban cada vez más tiempo rechazando pruebas acumuladas en contra de su teoría, su adhesión a la metodología de Popper no cesaba de perder credibilidad y parecían abonar aquella otra opinión, más cínica, expresada por Planck en su *Autobiografía científica y otros trabajos*: "Una nueva verdad científica no triunfa porque haya convencido a sus oponentes y les haya hecho ver la luz, sino más bien porque estos oponentes terminan muriendo, y crece una nueva generación que se ha familiarizado con ella."

El principio que hoy llaman de Planck los historiadores de la ciencia se opone al principio de Popper por cuanto resalta el elemento humano de la ciencia en detrimento de la lógica abstracta. De la misma manera que a los astrónomos se les ofrece elegir entre la gran explosión y el estado estacionario como explicación del universo, los historiadores pueden decidirse por la descripción de la ciencia de Planck o la de Popper. Veamos cuál parece más apropiada en este caso particular, sin por ello prejuzgar el curso general del progreso científico.

En 1959 una encuesta reveló que eran mayoría los astrónomos que rechazaban la creación continua, aunque solamente un tercio de los opinantes apoyaban la gran explosión. El propio Hoyle abandonó su modelo original y lo sustituyó, en 1964, por una hipótesis más complicada, afirmando que la abundante cuantía de helio en el universo implicaba que éste había sido "cocinado" a temperaturas que superaban los 10^{10} kelvins. Pese a todo, Hoyle se resistía

a abandonar la idea de la creación continua de materia.

Se necesitaba, pues, una nueva conmoción, y ésta fue el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo en microondas. Penzias y Wilson fueron los autores de este hallazgo, al medir la temperatura del espacio o, como diría un físico, al detectar la distribución espectral del cuerpo negro de Planck que corresponde a una temperatura determinada. Esta radiación electromagnética, capaz de ser detectada mediante instrumentos terrestres, invade todas las regiones interplanetarias e interestelares, y en su mayor parte se transmite en frecuencias concretas, determinadas por las propiedades físicas y químicas de las fuentes astronómicas. No puede, pues, caracterizarse con precisión por una única temperatura, y en lugar de ello los investigadores buscan una radiación que esté en equilibrio térmico a una temperatura concreta, es decir, una radiación que se distribuya de manera continua entre distintas frecuencias según la ley descubierta por Planck en 1900.

La distribución planckiana tiene una forma característica para cada temperatura. En nuestro universo actual, la radiación de fondo corresponde a una temperatura ligeramente inferior a tres kelvins, y su distribución presenta un máximo a una longitud de onda aproximada de 0,18 centímetros, situada en la región de microondas del espectro.

Indirectamente es posible inferir la temperatura del espacio. Según señalara Sir Arthur Stanley Eddington en 1926, la cantidad de luz que llega de todas las estrellas —es decir, la densidad de energía total— equivaldría a 3,2 kelvins si se transformara al equilibrio térmico. Eddington, sin embargo, no propuso un procedimiento concreto para comprobar su predicción.

Por aquellos días, cualquier científico de su talla hubiera considerado descorazonadora esa tarea. Obviamente, los termómetros corrientes habrían sido saturados por la energía procedente del Sol, de otros objetos celestes y de la atmósfera terrestre. Sólo instrumentos de suma precisión, sintonizados a longitudes de onda comprendidas entre el milímetro y el centímetro y aislados de fuentes locales, podían esperar detectar las microondas cósmicas.

Unos 15 años después de la sagaz predicción de Eddington, Andrew McKellar, del canadiense Observatorio Astrofísico Dominion, sugirió una manera práctica de medir lo que llamó la temperatura efectiva del espacio. McKellar, uno de los primeros astrónomos que afirmaron la posible existencia de moléculas, así como de átomos, en el espacio interestelar, propuso que se empleara como termómetro la molécula de cianógeno (CN). Observó que el cianógeno emite rayas espectrales cuya intensidad relativa corresponde al número de electrones en estados de energía superior, el cual a su vez es función de la temperatura del espacio; de ahí McKellar estimó que dicha temperatura era de 2,3 kelvins.

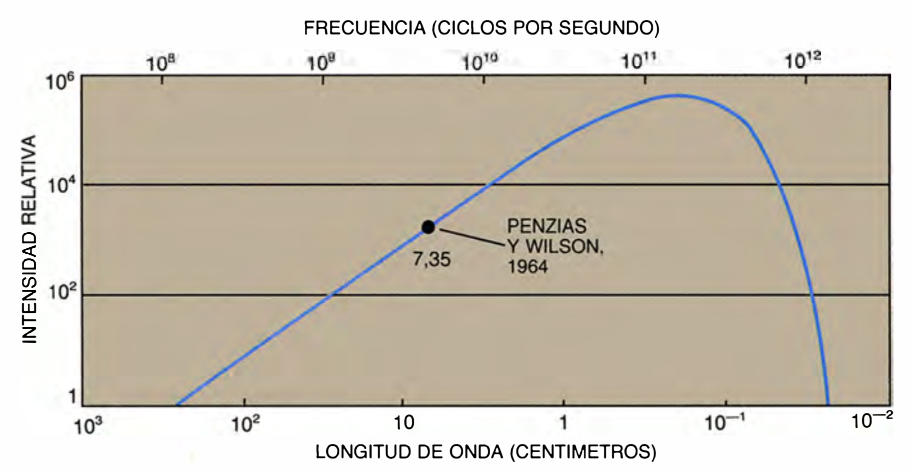
Estos métodos indirectos no podían eliminar las interferencias de fuentes locales, para lo cual es preciso detectar la radiación en sí y representar su distribución a través del firmamento. Los equipos de radar desarrollados en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) durante la segunda guerra mundial permitían justamente la detección directa del fondo cósmico, en el caso de que realmente se quisiera buscarlo.

En 1946, un grupo del MIT dirigido por Robert H. Dicke, informó acerca de mediciones de radiación atmosférica realizadas con un radiómetro de microondas, en las que observaron una "radiación de la materia cósmica en las longitudes de onda del radiómetro" bastante escasa, inferior a la equivalente a 20 kelvins, pero sin proseguir el examen de esta observación. Dicke, que después se trasladó a la Universidad de Princeton, recordó más tarde que "en la época de aquella medición no pensábamos en la radiación emitida por la gran explosión, sino tan sólo en un posible resplandor despedido por las galaxias más lejanas del universo".

Steven Weinberg, en su obra *Los tres primeros minutos*, sugiere dos razones por las que nadie emprendió una búsqueda sistemática de la radiación de fondo antes de 1965. En primer lugar, la gran explosión había perdido cierta credibilidad al no poder explicar la formación de elementos más pesados que el helio, por lo que no parecía importante comprobar las demás predicciones de la teoría. Por el contrario, la nucleosíntesis en las estrellas, teoría relacionada con la cosmología del estado estacionario, aparentemente era capaz de explicar la formación de los elementos pesados a partir de hidrógeno y helio, aunque no aclarase cómo había podido primero formarse el helio.

Weinberg aduce, en segundo lugar, una falta de comunicación entre teóricos y experimentalistas. Los primeros no se dieron cuenta de que podían observar la radiación con los equipos existentes, y los segundos no se percataron de la importancia de sus observaciones. Desde esta perspectiva es de destacar la intervención de Dicke, a la vez teórico y experimentalista: en efecto, juntamente con P. James E. Peebles, ayudó a relacionar un peculiar ruido de microondas con la teoría cosmológica.

La oportunidad perdida más notable se debió a una falta de entendimiento entre Gamow y Hoyle. Aunque cada uno criticaba la teoría del otro, todavía sostenían amistosas discusiones, y así, en el verano de 1956, Gamow le dijo a Hoyle que el universo debía estar lleno de radiación de microondas a temperatura de unos 50 kelvins —estimación a la que había llegado por sí mismo, después de haber publicado Alpher y Herman su predicción. Por aquel en-



4. EL ESPECTRO del cuerpo negro predicho por la teoría de la gran explosión implica que la primitiva radiación del universo parece ahora emanar de una fuente a pocos grados sobre el cero absoluto. Penzias y Wilson confirmaron el espectro en un único punto; desde entonces, otros lo han confirmado en una amplia banda de frecuencias.

tonces Hoyle estaba familiarizado con la tesis de McKellar que señalaba un valor de unos tres kelvins para la temperatura del espacio, y por ello argumentó que ésta no podía ser tan alta como Gamow pretendía. Pero ninguno de los dos cayó en la cuenta de que, si una medición directa pudiera confirmar dicho valor de tres kelvins y establecer además el espectro planckiano, ello refutaría la teoría del estado estacionario que, como reconocía Hoyle, predecía una temperatura espacial de cero.

Un problema de comunicación de tipo muy distinto, la transmisión por satélite, condujo al descubrimiento de la radiación cósmica de fondo. Los Laboratorios Bell deseaban que sus satélites transportaran la mayor información posible en las frecuencias de microondas, y para ello sus investigadores tenían que encontrar y eliminar los ruidos de cualquier procedencia. El dispositivo de retransmisión, derivado del trabajo de la propia empresa para el radar de usos bélicos, consistía en un receptor de bocina que los ingenieros Harald T. Friis y A. C. Beck habían construido en 1942. Otro ingeniero de los Bell, Arthur B. Crawford, llevó la idea mucho más allá, y en 1960 construyó un receptor de bocina de casi seis metros en la instalación de Crawford Hill. Dicha antena receptora, originalmente utilizada para recibir señales reflejadas en un globo de plástico situado en la parte alta de la atmósfera, quedó disponible para otros fines justamente cuando Penzias y Wilson lo necesitaban.

Se proponían éstos iniciar un programa de investigación en radioastronomía. A fin de preparar el instrumento de alta precisión que su trabajo exigía, debían en primer lugar desembarazarse del ruido de microondas. No lo consiguieron en sus primeros intentos. Por último, en enero de 1965, Penzias supo que Peebles tenía una teoría capaz de explicar el origen de la señal que con tanta obstinación persistía.

Peebles trabajaba entonces con Dicke, y éste rechazaba la hipótesis de que el universo necesariamente naciera de la gran explosión, creyendo más probable que hubiera pasado por etapas de expansión y de contracción. Al final de cada contracción, conjeturaba, toda la materia habría experimentado temperaturas y densidades suficientemente elevadas para descomponer los núcleos más pesados en protones y neutrones.

Así, aunque el universo de Dicke no surgiera de una gran explosión, cada uno de sus ciclos debería iniciarse con un cataclismo parecido. Además, la cosmología de Dicke suponía una bola de fuego primigenia, de alta temperatura de radiación, que mantendría su carácter de cuerpo negro planckiano a medida que se enfriaba, y cuya temperatura de radiación actual estimó en unos 45 kelvins. Evidentemente había olvidado su propia medición de 1946, que sugería la existencia de una radiación de fondo de temperatura inferior a 20 kelvins. Partiendo de la teoría de Dicke, Peebles realizó nuevos cálculos y obtuvo una estimación en torno de los 10 kelvins.

Dicke y Peebles, junto con dos alumnos graduados, P. G. Roll y D. T. Wilkinson, empezaron entonces a construir una antena en Princeton para medir la radiación cósmica de fondo. Antes de que tuvieran posibilidad de recabar resultado alguno, Dicke recibió una llamada de Penzias proponiendo que se reunieran para tratar sobre el ruido de la antena Crawford, que correspondía a una temperatura de aproximadamente 3,5 kelvins. Pronto quedó claro que Penzias y Wilson habían detectado ya la radiación predicha por Dicke y Peebles, y anteriormente por Alpher y Herman; sin embargo, hasta que aquellos astrónomos no hablaron con Dicke y Peebles no supieron el valor de su hallazgo. La interpretación teórica, esencial para convertir la simple detección en un verdadero descubrimiento, tardó más de diez años en llegar, sencillamente porque el anterior trabajo de Gamow, Alpher y Herman había pasado inadvertido para el mundo científico.

Los informes de los grupos de los Laboratorios Bell y de Princeton fueron enviados al *Astrophysical Journal* en mayo de 1965, y aparecieron juntos en el número del 1 de julio. La publicación desencadenó una oleada de artículos, tanto en los medios de comunicación de masas como en las revistas científicas. Incluso Hoyle admitió que la teoría del estado estacionario, al menos en su forma original, "tendrá ahora que abandonarse", aunque más tarde intentó agarrarse a una versión modificada que pudiera explicar la radiación de microondas. No obstante, la insistencia de Bondi en la comprobabilidad de la teoría del estado estacionario había vuelto a atrapar a sus proponentes, y cualquier tentativa de retorcer la teoría con el fin de explicar los nuevos descubrimientos corría el riesgo de ser considerada como seudociencia.

Aunque la rápida conclusión de la prensa fue que Penzias y Wilson habían confirmado definitivamente la gran explosión, los científicos reconocieron que sus resultados estaban limitados a unas pocas longitudes de onda agrupadas en un extremo de la curva de Planck. Había otras posibles causas de la radiación de fondo, tales como una combinación de fuentes radioeléctricas, que podían explicar aquellos datos. Hasta mediados los años setenta, las mediciones realizadas a distintas frecuencias no fueron suficientes para convencer a los escépticos de que la radiación de fondo realmente sigue la ley de Planck. El espectro de la molécula CN desempeñó un papel importante, cuando los astrónomos lo resucitaron y se apoyaron en el trabajo anterior de McKellar.

A finales de los años setenta, casi todos los primitivos defensores del modelo estacionario lo habían abandonado de manera explícita, o simplemente habían dejado de publicar sobre el tema. Una encuesta que realizó entonces entre los astrónomos americanos Carol M. Copp, de la Universidad de California en Fullerton, reveló que la mayoría apoyaba la gran explosión frente al estado estacionario.

El rápido abandono de la teoría del estado estacionario, desde 1965, demuestra que en este caso prevalece el principio de Popper sobre el de Planck. El descubrimiento de la radiación de fondo cósmica en microondas, combinado con los argumentos relativos a la abundancia de helio y las observaciones de remotas fuentes radioeléctricas y cuásares, convencieron a la mayoría de los partidarios del estado estacionario de que su teoría no merecía ya ser sostenida: una vez sometida a prueba, había resultado insatisfactoria.

Todavía en 1990, cuando la teoría del estado estacionario estaba casi olvidada, Hoyle y algunos de sus colaboradores intentaron revivirla como teoría de "mini-gran explosión", argumentando que no había pruebas en favor de la hipótesis de que una única explosión lo hubiera creado todo. Geoffrey Burbidge resumió recientemente este punto de vista en un ensayo publicado en estas páginas ("¿Sólo una gran explosión?"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo, págs. 38 y 39).

Aunque los partidarios de la gran explosión pudieron desechar la mayor parte de tales críticas, todavía quedaron sin resolver ciertos problemas. Por ejemplo, el fondo de microondas presentaba una excesiva uniformidad: carecía de las ligeras variaciones de temperatura y, en con-

secuencia, de densidad que parecían necesarias para sembrar posteriores agrupaciones gravitatorias. Sin tal siembra, no habría habido tiempo suficiente para producir las galaxias y las estructuras supergalácticas.

Finalmente, en abril de este año, George P. Smoot y sus colegas aportaron pruebas que pueden rellenar esta brecha de la teoría de la gran explosión. Expusieron un análisis de las medidas de la radiación de fondo cósmico recogidas por el *Explorador de fondo cósmico*, cuyos datos revelan ligeras variaciones de temperatura en la radiación cósmica de fondo, tal como habían esperado los teóricos de la gran explosión. Los investigadores interpretan estas "ondulaciones" como fluctuaciones de la densidad de materia y energía en una fase muy temprana de la historia cósmica, las cuales pueden ayudar a explicar cómo se agrupó la materia, sometida a la fuerza de su propia gravedad, a tiempo para formar estrellas, galaxias y macroestructuras.

¿Comenzó realmente el universo con una gran explosión o hubo una fase previa de contracción, una "gran implosión" ("big crunch") que condujo a las altas temperaturas y densidades? ¿Seguirá en perpetua expansión el universo, o finalmente se colapsará en un agujero negro? La creación del universo, ¿involucra la teoría cuántica de alguna manera fundamental? Estas ideas dominan actualmente el pensamiento físico (véase "Cosmología cuántica y creación del universo", por Jonathan J. Halliwell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1992, págs. 12-20). El hecho de que los científicos consideren dignas de una seria investigación tales cuestiones es de por sí, y en buena medida, consecuencia del descubrimiento de la radiación cósmica de fondo que ha transformado en ciencia empírica la cosmología.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IN SEARCH OF THE BIG BANG: QUANTUM PHYSICS AND COSMOLOGY. John Gribbin. Bantam Books, 1986.

THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND: 25 YEARS LATER. Dirigido por N. Mandolesi y N. Vittorio. Kluwer Academic Publishers, 1990.

MODERN COSMOLOGY IN RETROSPECT. Dirigido por B. Bertotti *et al.* Cambridge University Press, 1990.

THE CASE FOR THE RELATIVISTIC HOT BIG BANG COSMOLOGY. P. J. E. Peebles, D. N. Schramm, E. L. Turner y R. G. Kron en *Nature*, vol. 352, n.º 6338, págs . 769-776; 29 de agosto de 1991.

John Rennie

PHILIPPA MARRACK y JOHN KAPPLER: *En familia*

En un parque urbano a dos manzanas de su laboratorio de Denver, Philippa Marrack y John Kappler compiten por cubrir antes un centenar de metros a paso ligero. El camina con pasos medidos y confiados, los ojos fijos en el suelo, alerta ante cualquier pequeña imprecisión. Ella ha adoptado un aire más alegre, balanceando con garbo sus brazos y piernas, como si parodiara la marcha de un teniente inglés.

Hombro con hombro y acompasadamente, Marrack y Kappler llevan veinte años en la vanguardia de la inmunología. Formando equipo, han realizado un valiosísimo trabajo para explicar el delicado equilibrio del sistema inmunitario entre la autotolerancia y la autoinmunidad (aceptación y rechazo de los propios tejidos corporales). Investigan en el Instituto Médico Howard Hughes de Denver y pertenecen a la norteamericana Academia Nacional de Ciencias. Son marido y mujer.

"La comunidad científica nos considera como si los dos formáramos un solo individuo: Kappler y Marrack", dice ella frente a un plato de sopa en la cafetería del Centro Nacional Judío de Enfermedades Respiratorias e Inmunológicas. Desde el otro lado de la mesa, Kappler mueve la cabeza asintiendo.

Pero ni su éxito ni su relación personal estaban cantados. "Durante mis años en el instituto para chicas (en Inglaterra), a comienzos de los sesenta —recuerda Marrack—, no se me pasó nunca por la cabeza dedicarme profesionalmente a la ciencia." Lo que no le impidió cursar la licenciatura y doctorado en biológicas en la Universidad de Cambridge. "Me parece que simplemente estaba haciendo aquello para lo que me consideraba buena", observa. "Si hubiera fallado en cualquier escalón académico, habría abandonado." Y, en un pub, tras deliberar con sus amigas sobre qué lugar del mundo se parecería menos a Cambridge, optó por realizar el trabajo posdoctoral en la Universidad de California en San Diego en 1971.

Kappler, que nació en Baltimore en 1943, era un poco más formal. Acudió al Instituto Politécnico de Baltimore en la época del *Sputnik*, y se le aconsejó que cultivara sus intereses en ciencias y matemáticas. Llegado su momento, se inscribió en la Universidad de Lehigh para estudiar ingeniería, pero le "asustaron" las materias del primer año y se pasó a la química. Tras graduarse en Lehigh en 1965, se trasladó a la Universidad de Brandeis, para profundizar en bioquímica de la diferenciación celular.



Philippa Marrack y John Kappler, matrimonio de inmunólogos. Fotografía: Geoffrey Wheeler.

En 1967, tras completar su doctorado en Brandeis, entró en el laboratorio de Richard W. Dutton en la Universidad de California en San Diego. Dutton había logrado, hacía poco, cultivar células normales del bazo, entre ellas los linfocitos *T* que controlan el sistema inmunitario. "Esto ocurría justo en el momento en que la inmunología estaba a punto de estallar", recuerda Kappler.

Marrack y Kappler coincidieron en el laboratorio de Dutton durante dos años. En 1973, Kappler fue contratado por la Universidad de Rochester. Marrack le siguió y se casaron en 1974. "Yo marchaba con contrato, pero Pippa no", explica Kappler. "Simplemente aterrizamos allí, más o menos. Pippa vino a trabajar al laboratorio, y le conseguimos un sueldo para realizar trabajos de posdoctorado."

Había que crearle a Marrack una plaza paritaria en el equipo. Afortunadamente, les ayudó mucho el director del departamento, Frank E. Young, quien más tarde ocupó un cargo directivo en la administración federal. "Se percató de su valía, y Pippa consiguió un contrato bastante pronto", dice Kappler.

Para cimentar su credibilidad, Marrack solicitó una beca posdoctoral de la Asociación Americana del Corazón para un proyecto de investigación básica. "La universidad pudo comprobar que había alguien a extramuros que no me consideraba mero auxiliar de John", apostilla.

En Rochester, Kappler y Marrack

empezaron a abordar el fenómeno del reconocimiento, por parte de las células *T*, de los antígenos, las sustancias que distinguen inmunológicamente a una célula de otra. Si una molécula receptora de un linfocito *T* altamente específica se liga a un antígeno, el linfocito identifica a la portadora del antígeno como intrusa y la ataca. Gracias a su investigación, quedó establecido que las células *T* sólo pueden reconocer antígenos mostrados por ciertas proteínas de histocompatibilidad de la membrana.

Continuaron cosechando importantes descubrimientos en Rochester y después en Denver, en cuyo Centro Judío Nacional y en cuya Universidad de Colorado recalaron en 1979. Emplearon anticuerpos para sacar a la luz las propiedades de los receptores antigénicos de las células *T* que se exigen en su funcionamiento normal. Más recientemente, descubrieron los superantígenos.

Así llamaron a las sustancias que estimulan a las células *T* de una forma mucho menos selectiva que los antígenos ordinarios. Para activar una célula *T*, el antígeno debe acoplarse con precisión a cinco "llaves" diferentes de la molécula receptora. Los superantígenos logran el mismo efecto acoplándose tan sólo a una. En 1990 Marrack y Kappler demostraron que muchas moléculas bacterianas, entre ellas las toxinas que causan la infección estafilocóccica de los alimentos y el síndrome de choque tóxico, son superantígenos. Marrack demostró en el año 1991 que los superantígenos que se encuentran en los ratones eran de origen vírico.

La joya del currículum de Kappler y Marrack está tallada con la selección clonal. En 1988 demostraron que ese mecanismo era, en buena medida, el responsable de que el sistema inmune se tolere a sí mismo. Utilizando anticuerpos por sonda y ratones manipulados genéticamente, revelaron que el sistema inmunitario se somete a sí mismo a un riguroso examen. En el seno de la glándula del timo, las células *T* inmaduras son presentadas ante un abundante muestrario de autoantígenos de todas partes del cuerpo. Cualquier clon de células *T* que evidencie predilección por el ataque contra la propia identidad es rápidamente desechado antes de que pueda hacer ningún mal. "Es nuestro principal hito", asiente Marrack.

Quizás esos hallazgos no se hubieran materializado de no haber sabido integrar con tal fuerza investigación y vida privada. Diríase que el estar siempre tan juntos bastaría para destruir a cualquier pareja; pero ellos le quitan importancia y confiesan atenerse a las reglas del juego. Por ejemplo, a la hora de firmar un artículo, el autor del experimento principal aparecerá el primero, y el responsable del núcleo del tema irá siempre el último.

"Profesionalmente, nuestras personalidades y puntos de vista chocan con bastante frecuencia", explica Kappler, "pero lo referente al funcionamiento del laboratorio y al reparto de méritos lo resolvimos hace ya mucho." Sus saberes complementarios también han proporcionado cohesión a su colaboración. "Yo tengo una formación química, que a veces me supone una ventaja", dice Kappler. "Me parece que a Pippa se le dan mucho mejor los experimentos de tipo biológico. No recuerdo que hayamos trabajado nunca codo con codo."

El riesgo inherente a las asociaciones asentadas sobre destrezas complementarias es que cada uno puede decidir tomar su propio camino. Comienza a ocurrir ya con ellos. Ambos siguen participando en las investigaciones del otro, y el interés de los dos se resume aún en la misma cuestión: ¿cómo reconocen las células *T* a los antígenos? Pero confiesan sentir intereses dispares.

A Kappler le atrae conocer de qué modo la estructura del receptor antigénico de la célula *T* afecta a su funcionamiento. En los últimos años, ha estudiado el comportamiento del receptor sujeto a mutaciones. Pero reconoce que la representación real del receptor corresponde a una disciplina específica, la cristalografía de las proteínas, rama donde empieza a hacer sus pinitos.

Marrack siente el tirón celular. Le fascinan las enfermedades del sistema autoinmune, como la artritis reumática y algunos tipos de diabetes. El hiato que se abre entre el conocimiento actual de las células *T* y las manifestaciones patológicas de la enfermedad es inmenso. No necesita imaginarse la enfermedad autoinmune: su propio hermano padece de espondilitis anquilopoyética, especie morbosa que afecta a las articulaciones. Ella podría haberla contraído también, dice, si no fuera porque por misteriosas razones se desarrolla con menos frecuencia en las mujeres que en los hombres.

Los inmunólogos, recuerda el matrimonio, pensaban en su día que las enfermedades autoinmunes se seguían inevitablemente de un fallo de tolerancia, como pudiera ser que clones autorreactivos de células *T* burlaran los mecanismos de rastreo. La investigación más reciente ha puesto de manifiesto que, de hecho, todo el mundo parece tener algunas células *T* potencialmente autorreactivas; en general se hallan, no obstante, en estado de latencia. El enigma de la autoinmunidad se encuentra por tanto en saber qué es lo que activa tales células.

"He ido convenciéndome cada vez más de que las enfermedades autoinmunes no comparten los mismos mecanismos, de que la tolerancia se desmorona de muchas formas", dice Marrack. "Por eso pienso que tomar los experimentos en ratones como modelo para las enfermedades humanas quizá no sea necesariamente tan útil como se llegó a pensar." Siguiendo en esa línea, su marido añade: "Los experimentos en ratones pueden ser buenos para cada mecanismo por separado, pero la diabetes de los ratones constituye, tal vez, el modelo idóneo para una enfermedad autoinmune completamente diferente en los humanos. No hay necesariamente una correspondencia uno a uno."

Una enfermedad autoinmune sobre la que han venido realizando curiosas observaciones es la artritis reumática. Examinando el fluido de las articulaciones artríticas de los pacientes, encontraron una sobreabundancia de ciertos clones de células *T*, algunos de los cuales podrían haberse autorreactivado contra el cartílago u otras sustancias de las articulaciones. Para su sorpresa, faltaba en la sangre un subgrupo importante de células *T*.

Se desconoce todavía el significado de estos resultados. Pudiera ser que estos pacientes albergaran un superantígeno. Aunque los superantígenos parecen activar las células *T* a corto plazo, quizás acaben matando o neutralizando las células. Un superantígeno podría haber activado células *T* autorreactivas aletargadas en los pacientes; algunas de las células reactivas podrían haber sobrevivido a los efectos debilitadores del superantígeno y continuar sus ataques en las articulaciones.

La fusión de vida profesional y privada les ayudará a resolver la cuestión de la autoinmunidad. "Hay una ventaja sobreañadida —aduce ella—. Si necesita él pasarse el fin de semana entero trabajando en el laboratorio, lo que se convierte en problema para algunos matrimonios, me serena pensar que está allí trabajando para mí."

Ciencia y sociedad

Física de partículas

La fábrica de taus

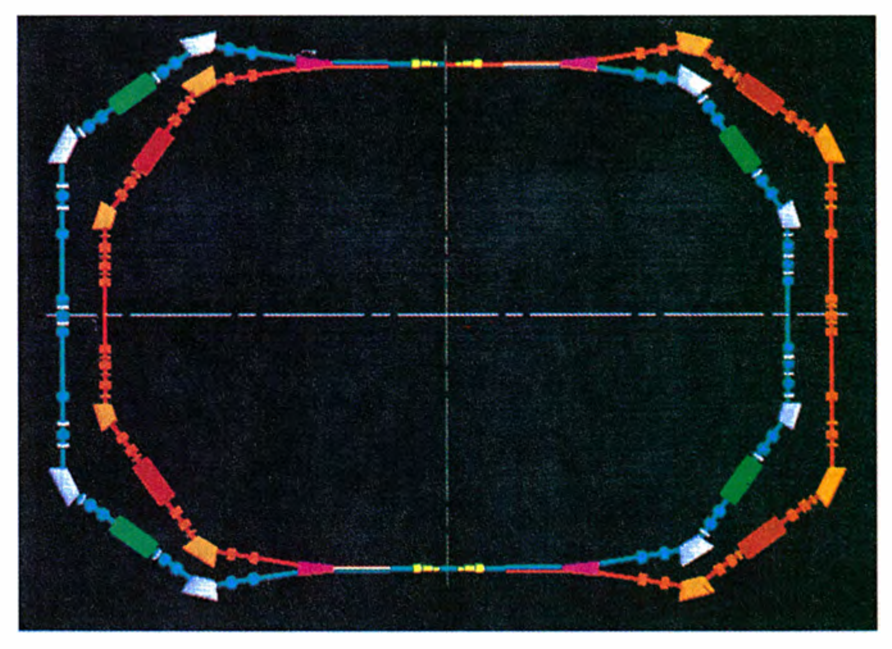
La física de las partículas elementales avanza por los dominios de las energías más altas posibles para examinar las porciones últimas de la materia. Dado que la mecánica cuántica establece una proporción inversa entre la longitud de onda de una partícula y el producto de su masa por su velocidad (lo que se llama el momento) y que el poder de resolución de un aparato es proporcional a la longitud de onda que emplea, se comprende que, para conocer los detalles más pequeños de la estructura material, se acuda a valores del momento cada vez mayores. Este es el principio que llevó a dar el salto del microscopio óptico al microscopio electrónico, que, en vez de "iluminar" la muestra con luz, lo hace con chorros de electrones de cierta velocidad. Los electrones aumentan su velocidad si se someten a una determinada diferencia de potencial eléctrico, lo que se llama una cavidad de aceleración, de manera similar a como la corriente de agua que cae por una cascada (diferencia de potencial gravitatorio) aumenta también su velocidad.

Si queremos poderes de resolución mayores, hemos de acelerar aún más a los electrones. Como las diferencias de potencial alcanzables son limitadas, se logran velocidades mayores sometiendo los electrones a muchas aceleraciones sucesivas. Ello puede obtenerse con muchas cavidades aceleradoras, unas a continuación de otras, de manera que los electrones las recorran sucesivamente; es lo que sucede en los aceleradores lineales. Cabe también que los electrones vuelvan a pasar muchas veces por la misma cavidad, recorriendo repetidamente una circunferencia; y eso ocurre en los sincrotrones. Cada sistema tiene ventajas e inconvenientes de viabilidad, de inversión inicial, de consumo energético y demás.

Entre los mayores inconvenientes de los sincrotrones, especialmente los de electrones, están las pérdidas de energía: cuando un electrón recorre una trayectoria circular pierde energía en forma de lo que se llama radiación de sincrotrón, que no es más que luz de longitud de onda correspondiente a la zona del ultravioleta y de los rayos X. Pero lo que es una pérdida para los físicos de partículas, que se ven obligados a gastar más energía para reponer la energía perdida, es una ganancia para muchos otros científicos que, en una creciente multitud de campos, utilizan la radiación de sincrotrón con grandes ventajas sobre la radiación producida, por ejemplo, por los tubos de rayos X.

El mayor acelerador lineal del mundo es el de Stanford (SLAC) y el mayor circular es el de electrones-positrones (LEP) del Laboratorio Europeo de Física de Partículas, o CERN. Lo que se ha dicho para los electrones se puede extender a cualquier partícula cargada eléctricamente y que no se desintegre antes de recorrer todo el trayecto acelerador. La naturaleza sólo ofrece una tal partícula, el protón. Los positrones y los antiprotones, que también cumplen los requisitos, se producen artificialmente, de manera que, en principio, los aceleradores suelen ser de electrones o de protones. Por mor de completitud, indiquemos que, si bien inicialmente las partículas aceleradas chocaban contra la muestra a analizar que constituía un blanco fijo, actualmente, a fin de que la energía del choque sea mayor, en los anillos de almacenamiento se provoca la colisión frontal entre dos chorros de partículas que avanzan en direcciones opuestas.

Además de los grandes aceleradores de partículas que, mediante el recurso a las mayores energías, exploran las partes más pequeñas de la materia, existen otros cuyo cometido estriba en medir con precisión en zonas ya exploradas en parte. Una de tales zonas es propia de las energías correspondientes a la partícula "tau" (especie de electrón posee una masa de aproximadamente dos protones) y al quark con encanto ("charm"), una de las seis clases de quarks. Los físicos de todo el mundo, deseosos de conocer a fondo los fenómenos asociados a estos rangos energéticos, han sugerido construir un acelerador que permita explorarlos con una precisión inigualada: lo que se conoce como una "fábrica" de taus y encanto. De manera análoga se ha sugerido construir aceleradores de precisión en la zona del mesón phi (una "phi factory") y en la del quark belleza (una "b factory"), de las cuales la primera se está construyendo en Frascati, cerca de Roma, y la segunda está buscando ubicación en Estados Unidos o Japón.



Los italianos comenzarán a construir Dafne, o la fábrica de mesones K y phi, a finales de año, mientras en España sigue en el aire la instalación de la fábrica de taus. En esquema, el guión magnético del acelerador de Frascati.

¿Dónde instalar la fábrica de taus? La sugerencia de construirla en España fue recogida primero por el gobierno regional andaluz para situarla en Sevilla; algo más tarde, el autonómico catalán presentó su candidatura para construirla en el campus de Bellaterra de la Universidad Autónoma de Barcelona. Otros gobiernos regionales han manifestado también su interés, pero los que realmente han avanzado en sus propuestas, de una u otra forma, han sido andaluces y catalanes. En concreto, la Generalidad de Cataluña ha razonado las ventajas estratégicas, científicas e industriales que le avalan y ha realizado un proyecto previo de tipo técnico que incluye un estudio geológico del terreno donde se construiría la instalación. El proyecto, siguiendo la propuesta original, incluiría no sólo la fábrica de taus, sino también una fuente de radiación de sincrotrón.

Debido a que este tipo de instalaciones son escasas, o únicas, los experimentos que se llevan a cabo en ellas resultan de ámbito internacional; para acometerlos se organizan colaboraciones de decenas de físicos de diversos países que, de alguna forma, colaboran en los gastos. Además, dado que España carece de especialistas en técnicas de aceleración y su capacidad tecnológica es insuficiente para emprender un proyecto de este tipo, la construcción requeriría una ayuda considerable del CERN. Por ello, aunque la iniciativa corresponde a España, el gobierno español ha pedido al CERN unos determinados niveles de participación económica, científica y técnica sin los cuales considera que el proyecto es inviable.

Las negociaciones son largas y, quizá debido a falta de concreciones que no siempre son fáciles de realizar, llevan ya bastante retraso. Si bien la toma de decisión sobre la participación del CERN debía haberse tomado, por su parte, en diciembre de 1991, se postergó hasta junio de 1992 y parece que ahora se retrasa medio año más. En el Consejo del CERN celebrado el pasado 25 de junio, se presentó un documento escrito en el que se exponía la posición del gobierno español y se explicitaba la participación que se pide al CERN. En concreto, se pide que el proyecto sea un proyecto del CERN, pagado mayoritariamente por España, en la fase de construcción y que sea pagado por el CERN en su fase de explotación. Ahora, los delegados de los distintos países deberán consultar con sus gobiernos. Pero son bastantes los que piensan que las condiciones establecidas serán inaceptables para el CERN. Una de las novedades del documento presentado es que ya no se habla de la fuente de radiación de sincrotrón, lo que supone una pérdida de una parte importante del atractivo del proyecto.

Con independencia de cuál sea la resolución final que, en función de la postura del CERN, adopte el gobierno español por lo que se refiere a dar luz verde al proyecto, a su ubicación y a la participación de la comunidad autónoma en la que se ubique, conviene hacer algunas reflexiones referentes a acciones que se deberán emprender a fin de aproximarnos a los niveles europeos en todo lo relacionado con los aceleradores de partículas y en los que sería de ayuda un proyecto como la fábrica de taus. Sin querer ser exhaustivos, debemos contemplar no sólo los aspectos científicos sino también los tecnológicos.

En las últimas décadas, la física de las partículas elementales ha constituido uno de los motores tecnológicos de los países desarrollados. Sus necesidades han influido de manera decisiva en el progreso de tecnologías muy variadas como pueden ser las electrónicas, de alto vacío, o de bajas temperaturas, de materiales magnéticos, de tratamiento y transmisión masiva de datos, etc. Se trata de campos en los que nuestro nivel tecnológico debe aumentar si nuestra tecnología ha de ser competitiva en Europa; la fábrica de taus sería una ayuda en esta dirección. Conviene tener en cuenta, además, que las técnicas de aceleración se utilizan, sobre todo, en campos muy alejados de los mencionados. Baste recordar que, en cuantía, el mayor número de aceleradores se utilizan en campos tan alejados de los mencionados como la medicina.

En lo concerniente a los aspectos científicos, hemos de tener presente que, a pesar de los esfuerzos realizados, nuestras comunidades de físicos de altas energías y de usuarios de radiación de sincrotrón son muy bajas en relación a otros países. Por lo que se refiere a la primera, el número de científicos en las universidades y centros de investigación españoles es, en comparación, muy bajo y su porvenir no es muy alentador, excepción hecha de Cataluña donde el gobierno regional y la Universidad Autónoma de Barcelona acaban de crear un Instituto de Física de Altas Energías que viene a dar respuesta a las necesidades de crecimiento. Por lo que ser refiere a los usuarios de la radiación de sincrotrón, es de esperar que la participación española en el Centro de Radiación de Sincrotrón (ESRF) de Grenoble les permita mejorar sus condiciones de trabajo, pero también es de esperar que ponga de manifiesto la necesidad de disponer de algún tipo de instalación propia, complementaria de la de Grenoble. (Ramón Pascual, catedrático de la Universidad Autónoma de Barcelona.)

Medio marino

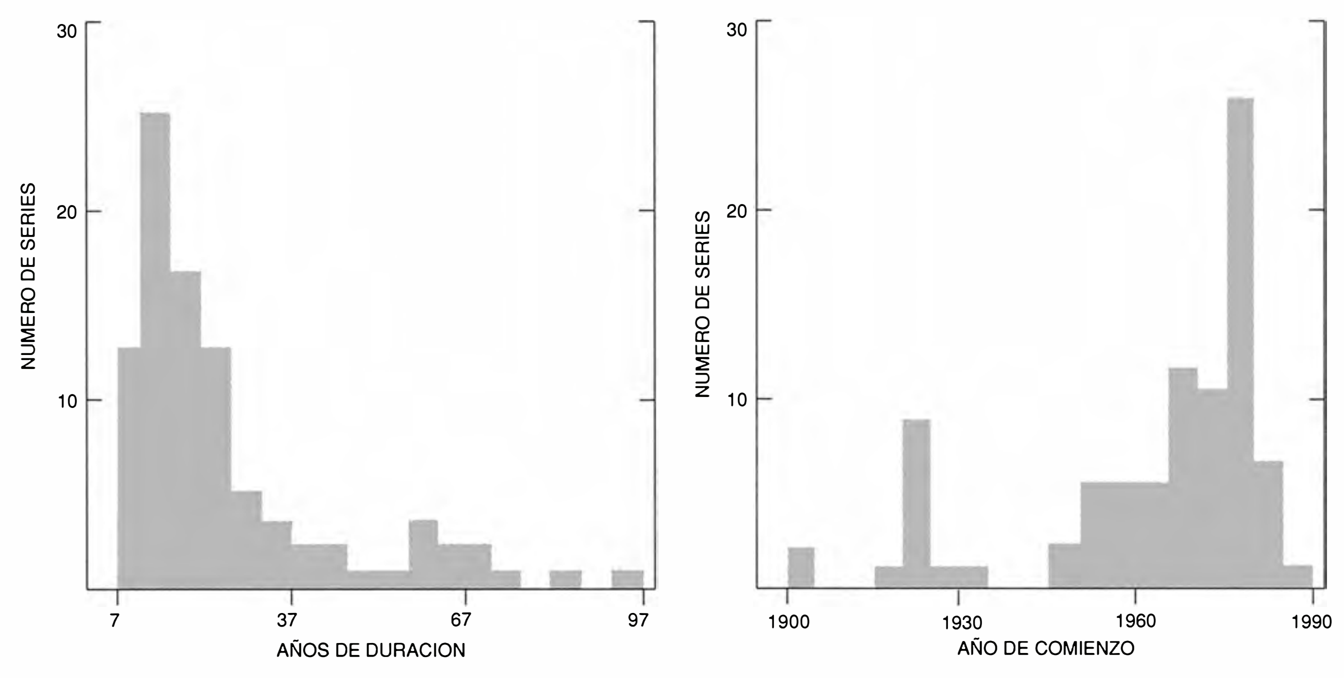
Detección de cambios

Que el medio marino varía a lo largo del tiempo y que estas oscilaciones pueden resultar importantes es algo de lo que nadie duda. El interés por conocer su causas y sus efectos se ha despertado, sin embargo, tras la comprobación reciente del aumento del nivel de mar, la erosión de las costas, la mortalidad de mamíferos marinos, el desplazamiento de poblaciones de peces y la regresión de la vegetación superior marina.

Esas perturbaciones del medio marino coinciden con el ascenso de la temperatura global y el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Y todos los hechos convergen en la denuncia de la actividad antropogénica como promotora de la alteración del funcionamiento natural del planeta.

Desgraciadamente, podemos decir muy poco sobre el alcance global de esos cambios, así como la parte que le corresponde al hombre. En primer lugar, los registros regulares de cambios en el medio marino son escasos y no permiten inferir si los observados son naturales o inducidos. Además de escasos, los registros se procuran y examinan sin coordinación alguna. Pero el análisis individual de una serie temporal sólo puede revelar patrones de variación en la zona estudiada, limitando la explicación de motivos a los mecanismos que operan en dicha zona. Y actuando así nunca se descubrirán las correspondencias de cambios temporales entre puntos geográficos alejados que nos facultarán para identificar las causas globales.

Algo se ha avanzado, a pesar de todo. Para empezar, se procedió al estudio simultáneo de series temporales de largo plazo registradas en diferentes laboratorios marinos. El análisis de trece series de temperatura superficial del mar, que abarcaban de 24 hasta 164 años, mostró máximos y mínimos comunes en todas las



Distribución de la duración de las principales series temporales de seguimiento de cambios en el medio marino disponibles en 20 de las principales estaciones de investigaciones marinas europeas

Ritmo de aparición de series temporales de seguimiento de cambios en el medio marino en las mismas estaciones del gráfico precedente. (Esquemas realizados por los autores.)

estaciones europeas implicadas, que se extienden desde el mar de Noruega hasta las aguas del Atlántico que bañan las Canarias.

Entre 1988 y 1990 se encontraron temperaturas que sobrepasaban en 1,5 grados los valores promedio. Por contra, se comprobó que en 1963 había ocurrido el fenómeno inverso, con un descenso de 1,25 grados por debajo de la media. Los dos únicos registros centenarios (Canal de la Mancha y Mar de Barents) mostraron su acuerdo en lo concerniente a valores mínimos y máximos en la primera mitad del siglo XX con temperaturas muy frías, entre 1900 y 1903, y notablemente cálidas en 1956.

El acuerdo general, en tiempo de aparición y magnitud de la anomalía, permitió formular hipótesis sobre los mecanismos subyacentes. Y así, el ascenso global de grado y medio durante los años 1988-1900 no puede atribuirse a la actividad humana, responsable de menos de 0,1 grado y año de tal incremento. El análisis comparado de los registros señalaba también la transmisión de las perturbaciones meteorológicas e hidrográficas a la cadena trófica marina.

A pesar de los beneficios evidentes de ese tipo de estudios comparados, la verdad es que se halla en peligro la propia existencia y continuidad de dichas observaciones. La tasa de formación de nuevas series aumentó, ciertamente, a lo largo de los últimos diez años, pero no es menos cierto que el ritmo de suspensión de ese tipo de proyectos experimentó un aumento paralelo; con otras palabras, se halla estancado el esfuerzo de seguimiento de los cambios, a largo plazo, en el medio marino. Es la permanente batalla entre el político de mira estrecha y el científico; el segundo sabe que sólo podrá aportar resultados fiables al cabo de varias décadas, en tanto que el primero demanda frutos más o menos inmediatos. Y en nuestro país, además, redoblada con la necesidad apremiante de cebar el historial académico para asegurarse una plaza laboral, urgencia que está reñida con el horizonte lejano donde siempre mira el investigador del seguimiento del cambio a gran escala. (Just Cebrián y Carlos M. Duarte, del Centro de Estudios Avanzados de Blanes.)

Paleontología

La explosión del Cámbrico

Los sedimentos de la paleontología se están revolviendo ante un nuevo y apasionado debate, centrado en conocer el motivo de la evolución, casi a la par, de animales muy curiosos en los comienzos del Cámbrico, hace unos 560 millones de años.

Las críticas llueven sobre Stephen Jay Gould, paleontólogo iconoclasta de Harvard, quien rechaza la explicación al uso de la "explosión del Cámbrico" y de acuerdo con la cual se abrieron nuevos nichos ecológicos (tales como convertirse en depredador) cuando los animales pudieron desarrollar tejidos duros generalizados. Gould no ve ningún nexo entre esa adquisición y el derroche de formas dispares y extrañas que se han conservado con suma finura en el yacimiento de Burgess Shale, de la Columbia Británica, que data de mediados del Cámbrico.

En *Wonderful Life* [escrito en 1989 y traducido al castellano recientemente], Gould postulaba la necesidad de mecanismos evolutivos especiales para crear tales "maravillas fantásticas". Para mayor escándalo de los paleontólogos, convertía al azar en el motor principal de la selección; la casualidad, y no la eficacia genética, determinó qué grupos de aquella fauna iban a poblar la Tierra con sus descendientes.

Los profesionales más reticentes no dan cuartel y se oponen a que esos planteamientos tan radicales cuajen en una teoría aceptada. Se le reprocha que sus concepciones van mucho más allá de lo que garantizan los datos. El propio Derek E. G. Briggs, de la Universidad de Bristol, a quien se le debe la reconstrucción de numerosos fósiles de Burgess y constituía uno de los héroes del relato de Gould, discrepa abiertamente

de su conclusión; le recrimina que intente poner sordina a la explosión del Cámbrico.

Reconstruidos a lo largo de la última década por paleontólogos de Inglaterra, entre ellos Briggs, Harry B. Whittington y Simon Conway Morris, de la Universidad de Cambridge, los fósiles de Burgess Shale son una auténtica caja de sorpresas. Miden, en su mayoría, escasos centímetros de longitud. Abundan los que se suponen artrópodos con algunos crustáceos; otros presentan rasgos de arañas y escorpiones, xifosuros o trilobites. Pero de la inmensa mayoría no puede decirse con propiedad que sean una cosa u otra. A quien no le sobran segmentos cefálicos le faltan antenas o cualquier otra característica que impide su adscripción a un grupo conocido.

Gould destacaba en su libro un mínimo de ocho formas de Burgess sin lazos de relación con ninguno de los grandes grupos sistemáticos, o *phyla*. Ocurría así con *Hallucigenia*, un animal vermiforme al que Conway Morris le dio ese nombre por su "aspecto onírico", y *Wiwaxia*, también reconstruido por Conway Morris. Según su apariencia, *Hallucigenia* andaba sobre una doble hilera de espinas y, en el dorso, portaba una sola fila de tentáculos; por lo que parecía también, *Wiwaxia*, un organismo oval y aplanado, se arrastraba entre los sedimentos, con su dorso cubierto de placas de las que sobresalían dos filas de espinas.

Ante esos rasgos singulares, Gould sugería que nuestros océanos contienen muchas más especies que parten de muchos menos planes anatómicos. Tras el florecimiento del Cámbrico temprano, señalaba, la historia de la vida es una historia de eliminación en masa seguida de procesos de diferenciación en el seno de unas cuantas estirpes supervivientes.

No tardaron los biólogos en descubrir los flecos de una tesis que defendía la exigencia de un mecanismo evolutivo distinto del proceder aceptado para explicar la biodiversidad del Cámbrico. Denunciaron que Gould caía en el viejo hábito de los taxónomos de colocar los fósiles extraños en nuevas clases, práctica que acaba por exagerar el grado aparente de disparidad que resulta de la radiación del Cámbrico, asegura Briggs. Además, la muestra de organismos de ese período que se nos ofrece es, morfológica y ecológicamente, menos dispar, y no más diversa, que la fauna de artrópodos actuales.

Otros paleontólogos remachan el mismo clavo: no conviene tomar la singularidad o rareza taxonómica como medida o criterio para establecer la diversidad. Para Andrew B. Smith, del Museo Británico de Historia Natural, varios estudios sobre equinodermos (estrellas de mar y afines) han caído en el mismo error, y así reclaman una evolución acelerada para el Cámbrico.

Por si fuera poco, los ejemplos esgrimidos por Gould en apoyo de su tesis comienzan a perder valor. Si bien en 1989 se creía que ni *Wiwaxia* ni *Hallucigenia* tenían parientes conocidos, las opiniones están cambiando. En 1990, Nicholas J. Butterfield, de la Universidad de Harvard, publicó en *Paleobiology* una investigación minuciosa de las espinas y placas de *Wiwaxia*, cuyos resultados le movían a concluir que el organismo puede acomodarse entre los gusanos poliquetos, un grupo con más de 5000 especies vivas.

Un año después, L. Ramsköld y Hou Xianguang afirmaban en *Nature* que la supuesta rareza de *Hallucigenia* obedecía a que siempre se le había mirado... al revés. De la comparación exhaustiva con otros fósiles se infería que las dos hileras de espinas de *Hallucigenia* constituían en realidad una armadura; no eran, pues, las patas. Y la fila única de tentáculos que nos había llegado correspondía, con seguridad casi total, a la mitad de un par de filas de patas tentaculares. En breve, el *Hallucigenia* invertido tenía su hueco entre los Onicóforos, *phylum* de gusanos de patas blandas. (Algunos, sin embargo, discrepan de esa interpretación,)

Y la vuelta al redil linneano parece el destino de otros individuos anómalos. *Amiskwia*, un raro organismo nadador de Burgess, que Gould creía huérfano, podría muy bien pertenecer al grupo de los Quetognatos. Y según Conway Morris, hasta el más fantástico de la fauna maravillosa de Gould, *Anomalocaris*, un depredador de notable tamaño, podría estar emparentado con un grupo fósil descubierto recientemente.

Gould no tira la toalla. El admitir que *Wiwaxia* y *Hallucigenia* se incrusten en grupos conocidos es un arma de doble filo. Su nuevo estatuto puede reducir el número de *phyla* cámbricos, señala, pero aumenta la diversidad de los *phyla* restantes; en cualquier caso, prosigue, quedan muchos ejemplos extraños y nadie podrá negar que el Cámbrico fue un crisol.

Pero Gould ha emprendido una retirada táctica. Su tesis fundábase, en buena medida, en los animales que escapaban a todo cuadro sistemático al uso. Comienza ya a admitir que la singularidad taxonómica, por sí sola, es irrelevante para calcular y a reconocer que si hubo o no una extraordinaria variabilidad lo sabremos cuando poseamos técnicas cuantitativas para la caracterización del morfoespacio.





Extraños fósiles de la formación de Burgess Shale, en la Columbia Británica, han sido identificados como miembros de grupos conocidos. Wiwaxia corrugata (izquierda) *puede estar emparentada con* Bhawania heteroseta (derecha), *un gusano poliqueto actual.*

Antropología

Al este del Edén

Los cráneos que aparecen en las fotografías proceden de la provincia china de Hubei y nos hablan de una época anterior a la aparición de *Homo sapiens*. Los paleontólogos que los desenterraron afirman que nos dicen muchas cosas sobre esa especie, tras recopilar pruebas faunísticas y de otro tipo que fechan los cráneos en al menos 350.000 años de antigüedad, bastante antes del momento en que otros expertos sitúan a los primeros hombres de aspecto moderno en Africa y solamente en Africa. La cara plana y los malares altos de estos cráneos atestiguan una continuidad racial con los asiáticos modernos que contradice la teoría del origen común en Africa, aseguran.

"Yo no afirmaría que Asia es la patria de los seres humanos modernos", dice Dennis A. Etler, un doctorando de la Universidad de California en Berkeley, quien, junto a Li Tianyuan, del Instituto de Arqueología de Hubei, informó sobre los cráneos en *Nature*. "Semejante aseveración repugna a lo que pretendemos demostrar, a saber, que los humanos modernos no tienen un único lugar de origen".

Li encontró los cráneos, deformados e incrustados en depósitos minerales, bajo suelo recientemente aterrazado que ya había proporcionado otros fragmentos de huesos fósiles. El aplastamiento enmascaraba algunos rasgos, y la matriz mineral que todavía obstruye las cajas craneanas impide medir directamente su capacidad. Etler sostiene, no obstante, que la morfología externa revela un tamaño cerebral en el "extremo superior de *H. erectus*, sino más allá". Añade que la continuidad con esta especie más temprana se hace manifiesta en la bóveda craneana, que es larga, baja y angulada como un balón de rugby.

A pesar de ello, Christopher B. Stringer, adscrito al Museo de Historia Natural de Londres, continúa defendiendo una patria africana para la humanidad. Dice que los cráneos chinos pueden representar una rama abortada surgida de una población más antigua que algunos especialistas denominan *Homo heidelbergensis*. "*H. heidelbergensis* pudo haberse escindido, transformándose en los neandertales en Europa, en Africa en los seres humanos modernos y en China... no lo sabemos. Los seres humanos modernos bien datados no aparecen en China hasta hace 35.000 millones de años. En Africa tenemos una cadena que muestra la transición."





Biología del desarrollo

Linajes celulares

El desarrollo de los organismos pluricelulares requiere una gran proliferación celular para formar los diferentes órganos y tejidos. Uno de los primeros problemas que se plantea el investigador para entender el desarrollo de un organismo es la determinación de su linaje celular, es decir, la descripción de la historia de cada célula desde el oocito fecundado hasta la formación de órganos y tejidos adultos. Este tipo de análisis ha permitido determinar el origen de cada parte del cuerpo y establecer las relaciones entre las diversas partes. Podemos así deducir las subdivisiones principales del embrión y cómo se forman durante el desarrollo.

Los primeros embriólogos describieron el linaje celular de embriones de invertebrados (sanguijuelas, moluscos, poliquetos), ya que estos animales presentaban ciertas ventajas para semejante tipo de análisis: algunos embriones son transparentes y el linaje se puede seguir directamente hasta estadios de desarrollo avanzados; otros presentan coloraciones o gránulos específicos en ciertas células, o blastómeros con diferentes formas o tamaños, características que pasan a la progenie celular. Los resultados de estos trabajos permitieron definir las relaciones específicas entre patrones de división en el embrión temprano y la formación de determinados tejidos y órganos.

La invariancia en el linaje observada en muchas especies, junto con los efectos producidos en el desarrollo tras la ablación de ciertos blastómeros, llevó al concepto de desarrollo en mosaico, según el cual existen depositados en el huevo factores locales que determinan el desarrollo de las diversas partes del organismo. Por otra parte, el concepto de desarrollo regulativo, opuesto al anterior, provenía de resultados de ablación y transplante en diferentes organismos como el erizo de mar, y defendía que la diversidad morfológica se establecía de forma gradual a través de interacciones entre las diversas partes del embrión.

El debate en torno al carácter regulativo o en mosaico del desarrollo de las diferentes especies, asentado en buena parte en estudios de linaje celular, inundó la literatura embriológica durante la última década del siglo pasado y las primeras de éste. Dichos trabajos iniciales se basaban en la observación directa de embriones, y por su propia naturaleza estaban limitados o bien a los primeros estadios del desarrollo o bien a organismos con muy pocas células. Este enfoque se emplea ahora reforzado con nuevas técnicas microscópicas y fotográficas. Destaca el análisis del nematodo *C. elegans*, el único organismo del que se conoce su linaje celular completo.

Pero se trata de un método inadecuado cuando ha de habérselas con embriones que no son transparentes o que contienen gran número de células. Se han ideado varias técnicas para determinar el linaje celular en estos otros casos. Una de las más utilizadas ha sido la inyección de enzimas, tintes o sustancias fluorescentes en la célula cuyo linaje se pretende seguir. La sustancia inyectada debe ser estable y fácil de detectar, no pasar de una célula a otra ni afectar el desarrollo. El linaje de la célula inyectada se puede así seguir durante cierto número de divisiones tras la iluminación del fluorescente o la detección de la reacción enzimática. Este método se ha empleado para resolver el linaje celular en diversas especies, si bien requiere que las células inyectadas sean relativamente grandes y que el desarrollo del embrión se pueda seguir luego sin dificultad. La eficacia del método depende del grado de dilución de la substancia marcadora, razón por la cual sólo se marcan clones pequeños.

Aunque menos, se ha recurrido también, en el análisis del linaje celular, al transplante de células o la

formación de quimeras con células de especies fácilmente diferenciables.

La biología molecular ha aportado nuevos medios para el estudio de los linajes celulares. En los ratones se ha experimentado con cierta técnica fundada en la infección por retrovirus modificados de embriones tempranos. El virus se integra establemente en el genoma y se transmite luego a las celulas descendientes. Si en el genoma vírico quedan incluidas las secuencias necesarias que determinan cierta proteína detectable, como la beta-galactosidasa cuya presencia no afecta la viabilidad del organismo, podemos descubrir, por reacción enzimática, la progenie de la célula infectada. A mayor abundamiento, han servido de indicadores de linajes los anticuerpos específicos que reconocen proteínas que están ya presentes en fases precoces del desarrollo.

En *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre, los métodos habituales en la investigación sobre el linaje celular parten de mosaicos genéticos, sean éstos muy tempranos y producidos por pérdida de un cromosoma en la primera división del zigoto, o sean, lo más frecuente, producidos por recombinación mitótica inducida por rayos X. El método requiere la utilizacion de mutaciones marcadoras que permitan reconocer el clon obtenido.

El sistema de recombinacion mitótica inducida tiene la ventaja de que los clones se pueden generar en cualquier momento del desarrollo y, por tanto, se pueden definir las relaciones de linaje en cualquier estadio. Por ejemplo, mediante la irradiación de embriones o larvas heterozigóticos para el marcador recesivo epidérmico *mwh*, se producen clones homozigóticos para el marcador en los que todas las células manifestarán la característica mutante y, por ende, se reconocerán en la epidermis. Esa estrategia técnica no se ha limitado a la epidermis: mediante mutaciones en genes que determinan ciertas enzimas se han realizado experimentos similares para conocer el linaje de estructuras internas. Un marcaje genético, como los últimos descritos, tiene la ventaja de ser indeleble y heredable durante todas las divisiones. Los marcadores usados no afectan al desarrollo de la célula y son fácilmente reconocibles. Posibilita, además, conjugar técnicas moleculares con marcaje genético; así acontece con los genes cuya actividad se marca con la expresión de la enzima beta-galactosidasa en conjunción con marcadores genéticos como *mwh*.

Recientemente se ha puesto a punto para el estudio del linaje en el embrión de *Drosophila* una nueva técnica llamada fotoactivación local de fluorescencia, que permite la observación del linaje celular en el momento deseado del desarrollo; el embrión se inyecta con un compuesto derivado de fluoresceína que no es fluorescente, salvo que se ilumine con una luz de 350 nanómetros (inocua para el desarrollo). El compuesto químico va unido a dextrano (para impedir su paso entre células) y a un péptido que lo porta hasta el núcleo, para observar mejor el linaje celular. Tras la iluminación de una célula el compuesto se activa y el linaje de la misma puede seguirse por observación de su fluorescencia. Este método, apto para ser usado en principio en otros organismos, ofrece la doble ventaja de permitir la observación de linajes en vivo y facilitar la activación del compuesto en el momento deseado. (Ernesto Sánchez-Herrero y Ginés Morata, del Centro de Biología Molecular de Madrid.)

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Atrapado en las garras

La relación de equilibrio entre el depredador y su presa asegura la estabilidad del ecosistema y ha dado lugar, en la historia de la vida, a un sutil refinamiento armamentario en unos y a unas habilidades esquivas, no menos depuradas, en otros. En salir airosas les va a las presas la vida; en no fallar el golpe demasiadas veces, asientan los depredadores sus posibilidades de reproducción y la propia supervivencia.

He comprobado la ponderada habilidad cazadora de los murciélagos en la hoz que taja cierta montaña próxima a mi hogar. Cuando muere el día y obscurece, una bandada, no muy numerosa, de murciélagos planea sobre el agua represada. Creía yo que esos mamíferos alados se alimentaban sólo de polillas que cazaban al vuelo, y algo había leído sobre los finísimos receptores de ultrasonidos que poseen éstas para sortear el peligro.

Jamás pensé que algún día asociaría los quirópteros a las gaviotas. Y cuando lo hice, me precipité. Atacan a los insectos que descansan en la superficie del agua, por ser su medio, o porque han caído allí agotadas sus fuerzas. Supuse, erróneamente, que se servirían de las fauces para atrapar a sus víctimas en un bocado rápido. La fotografía me sacó del error. El murciélago caza en el agua con las garras, que extiende en un prodigio de elasticidad. Bien asegurada, se lleva la pieza cobrada a la boca.



Foto de la derecha
distancia focal: 135 mm macro
diafragma: F = 14
exposición: 1/6000 de segundo
película: ISO = 100





Ratas topo desnudas

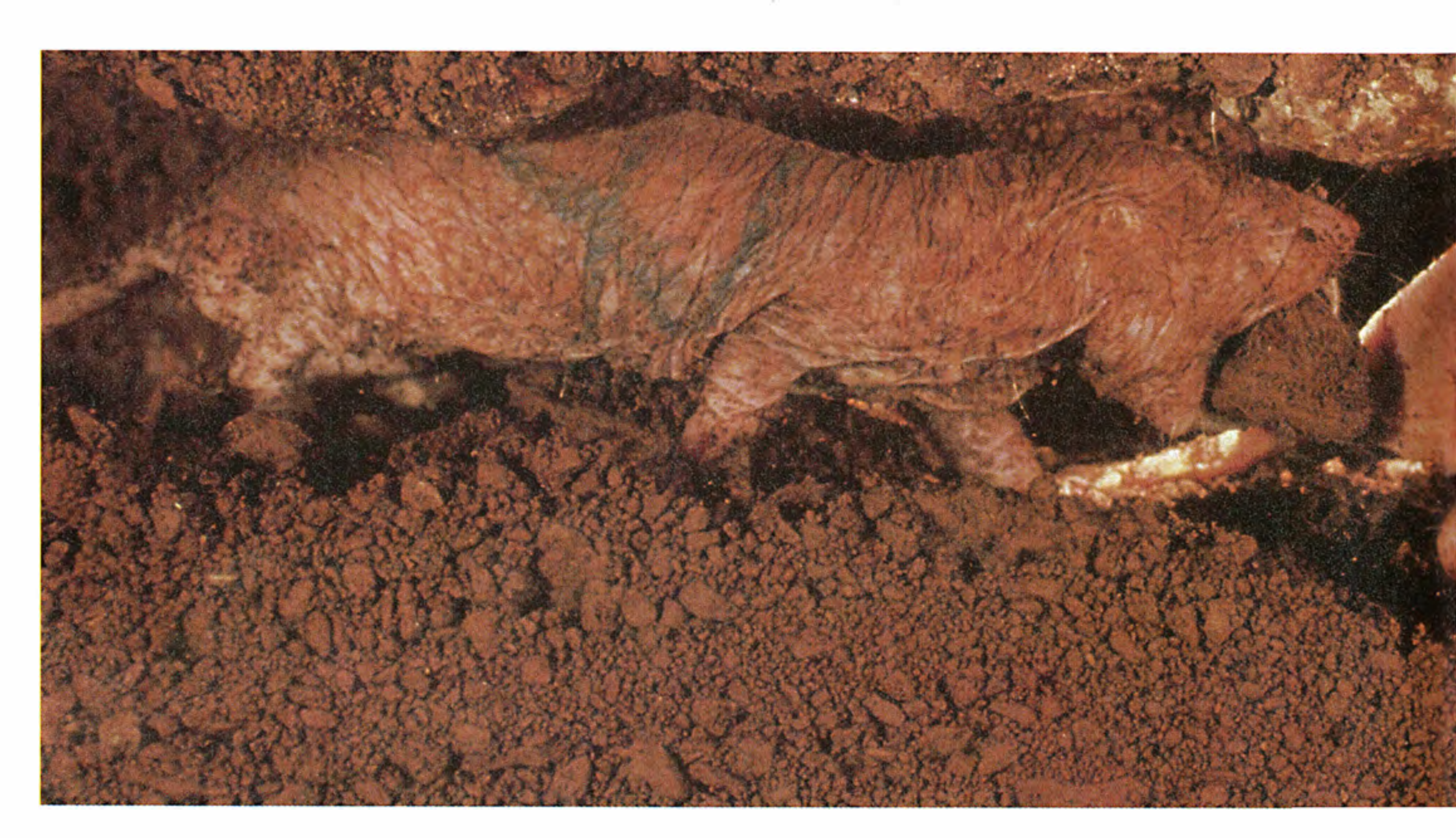
La mayoría de estos roedores coloniales, obreros que atienden a una hembra fértil, no participan en la reproducción. Su estructura social recuerda bastante la de las abejas y otros insectos

Paul W. Sherman, Jennifer U. M. Jarvis y Stanton H. Braude

Bajo el suelo de Africa oriental, duro como la roca, hay redes kilométricas de galerías subterráneas que pueden cruzarse en muchos puntos, rivalizando en complejidad con el laberinto de Dédalo. Por su apariencia, esos excavadores de vías subterráneas han sido llamados salchichas con dientes de sable, bebés morsa o, simplemente, "bichos sin gracia". Hablamos de las ratas topo desnudas. El carácter insólito de esos roedores lampiños, rosados y de dientes salientes no se limita a su fisionomía. Su estructura social se acerca a la de algunos insectos más que a la de la mayoría de los mamíferos. Las ratas topo desnudas son eusociales, es decir, desarrollan genuina socialidad.

Desde Aristóteles, el hombre se ha sentido fascinado por el altruismo, la cohesión y la complejidad de las colonias de insectos eusociales, en particular las de termes, hormigas, ciertas avispas y abejas. Se ha descubierto también conducta eusocial en áfidos japoneses y en un escarabajo australiano. Las colonias de insectos eusociales, que pueden contener desde varias docenas de miembros hasta más de un millón, comparten tres características: convivencia de dos generaciones al menos, reproducción restringida a unos pocos individuos y cooperación de los no implicados en la reproducción en el cuidado de las crías.

Aunque el cuidado cooperativo de la prole se ha observado en muchas aves y algunos mamíferos, como los perros salvajes, se creía que la eusocialidad sólo existía entre los insectos sociales. Pero el descubrimiento, en los años ochenta, de que ese fenómeno se presentaba en las ratas topo desnudas promovió diversos empeños investigadores destinados a desentrañar la naturaleza de la eusocialidad en los vertebrados y su relación con la reconocida entre los insectos. Del estudio de las ratas topo desnudas se colige cuáles fueron las posibles fuerzas ecológicas y genéticas que han configurado la



1. LAS RATAS TOPO DESNUDAS viven en galerías subterráneas de Kenia, Somalia y Etiopía. Los roedores cooperan para excavar su enorme red de túneles al tiempo que buscan comida: los tubérculos de plantas geófitas. Un animal muerde el suelo, mientras que otros se encargan de llevar la tierra removida a una salida de la superficie, donde otro compañero más corpulento la expulsará.

eusocialidad, ese fascinante rompecabezas evolutivo.

Para Charles Darwin, los insectos eusociales como las abejas melíferas constituían, en potencia, el talón de Aquiles de su teoría de la evolución mediante selección natural. ¿De qué manera, se preguntaba Darwin, podían las castas no reproductoras evolucionar por etapas graduales si no dejaban descendencia? ¿En virtud de qué procesos se fueron perfeccionando las morfologías y los comportamientos especializados en los obreros, no implicados en la reproducción? Darwin proponía una solución sencilla y clarividente: en esas situaciones, sugirió, la selección natural actuaba sobre familias enteras lo mismo que sobre los individuos.

Mediados los años sesenta, William Hamilton, biólogo contratado hoy por la Universidad de Oxford, cuantificó la idea de Darwin a través del diseño de un modelo genético que acabó conociéndose como selección de parentesco. Al ayudar a los padres en el cuidado de los hermanos, algunos de los cuales pueden dejar descendencia, exponía Hamilton, los obreros no reproductores aumentan la representación de sus propias características genéticas (en este caso, morfologías especializadas y tendencias de ayuda).

Debido a un origen común, los hermanos que pueden reproducirse portan y transmiten alelos para los mismos rasgos que sus hermanos y hermanas no reproductores. Al especializarse en determinadas tareas comunales, como cuidar de las crías o proteger la colonia, los obreros aumentan el rendimiento reproductor de sus padres por encima del que ellos podrían alcanzar por sí mismos. Así, rasgos beneficiosos para la supervivencia de los progenitores y de la colonia, entre los que se cuentan la esterilidad de los obreros y especializaciones para la ayuda, coevolucionan aunque los obreros no intervienen nunca en la reproducción.

La hipótesis de Hamilton ayuda a aclarar una amplia gama de comportamientos de connotaciones altruistas en la naturaleza, eusocialidad incluida. Y explica también, así parece, la distribución de la eusocialidad en los insectos. Hormigas, abejas y avispas (orden Himenópteros) poseen un sistema de determinación del sexo denominado haplodiploidía. Los machos se desarrollan a partir de óvulos no fecundados y presentan, pues, un solo juego de cromosomas: son haploides.

Las hembras, en cambio, se desarrollan a partir de óvulos fecundados; reciben así dos juegos de cromosomas, la dotación procedente del óvulo y la del espermatozoide: son diploides. Este mecanismo de determinación del sexo significa que, por término medio, las hermanas son iguales en tres cuartas partes: comparten todos los genes del padre más la mitad de los de la madre. Madres e hijas son iguales en un cincuenta por ciento, mientras que hermanos y hermanas son semejantes en sólo una cuarta parte. Puesto que una madre tiene más genes en común con una hermana que con su propia descendencia, las hembras de himenópteros evidencian un mayor interés en criar hermanas.

PAUL W. SHERMAN, JENNIFER U. M. JARVIS y STANTON H. BRAUDE comparten un mismo interés por las así llamadas salchichas de dientes de sable. Sherman, que se formó en la Universidad de Michigan, enseña etología en la de Cornell e investiga el comportamiento social de mamíferos y aves. Jarvis, experta en demografía y fisiología de las ratas topo africanas, se doctoró por la Universidad de Nairobi y es profesora de zoología en la de Ciudad del Cabo. Braude, que procede de Michigan, pertenece al claustro docente de la Universidad de Missouri en Saint Louis.

Los libros de texto suelen cifrar en la haplodiploidía la explicación última de la eusocialidad. Pero la observación abona la intervención de otros factores. En primer lugar, las asimetrías de parentesco asociadas con la haplodiploidía sólo se dan cuando la colonia contiene exclusivamente una reina que se aparea una sola vez. La realidad nos dice, sin embargo, que en muchas colonias eusociales existe un apareamiento



promiscuo y múltiples reinas. Estos factores anulan las ventajas genéticas del comportamiento de ayuda porque las hembras guardan entonces un parentesco genético mucho mayor con los hijos que con sus hermanas.

En segundo lugar, aunque todas las especies de Himenópteros se reproducen por haplodiploidía, sólo una fracción de ellas son eusociales. Para complicar todavía más las cosas, todos los termes son eusociales... y diploides. Como señalan Malte Andersson, de la Universidad de Göteborg, y Richard D. Alexander, de la Universidad de Michigan, aunque la selección de parentesco es crucial para explicar la eusocialidad, no podemos ver en la haplodiploidía una razón necesaria ni suficiente de dicho comportamiento.

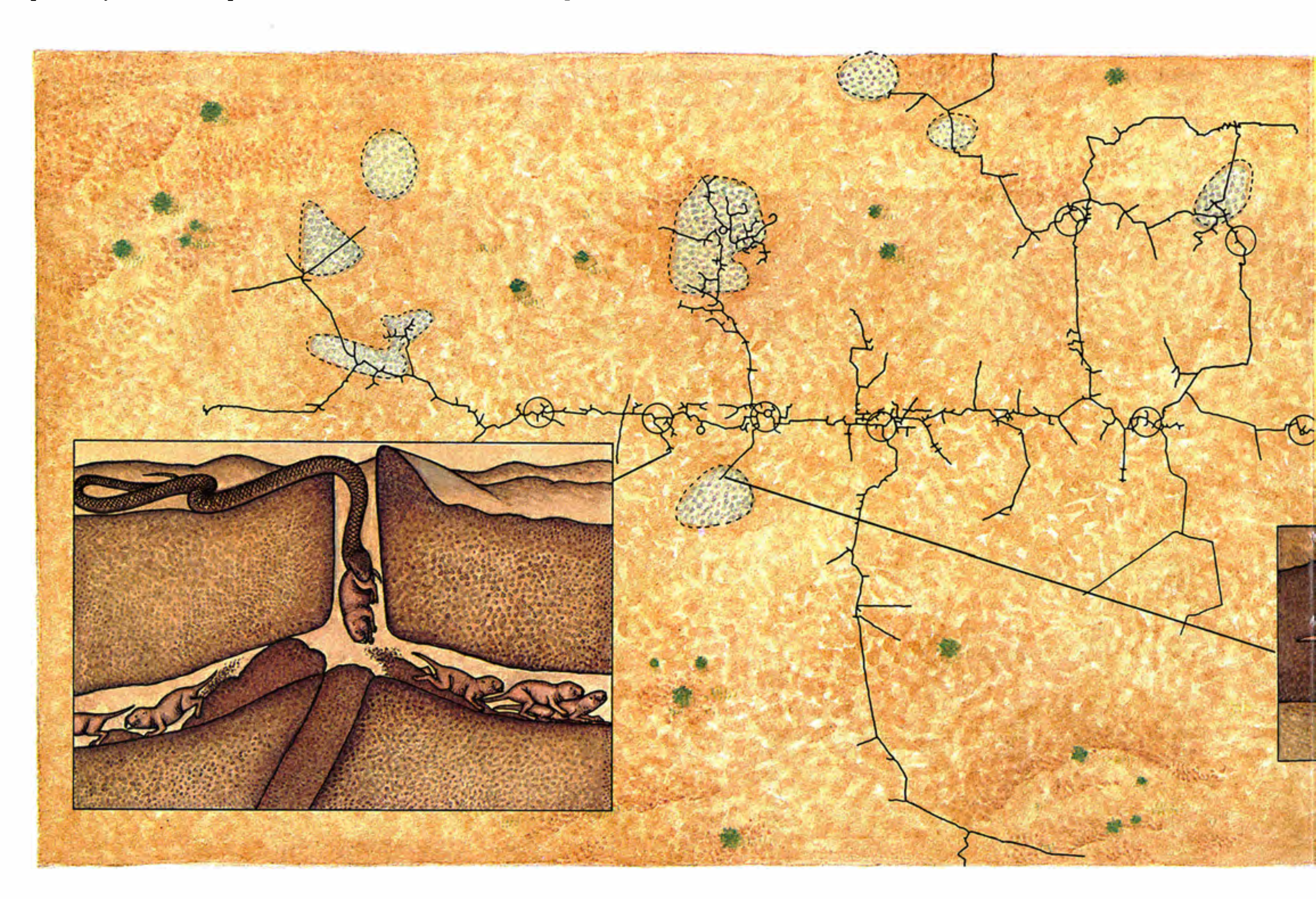
Creíase que la eusocialidad era fenómeno exclusivo de los insectos, hasta que, en 1981, Jarvis, coautora de este artículo, dio a conocer que las ratas topo desnudas viven en colonias donde reina una sola hembra reproductora. La rata topo desnuda es un roedor diploide cuyo número cromosómico es 60. El zoólogo alemán Eduard Rüppell la había descrito, en 1842, como un animalillo pequeño y casi lampiño de Africa oriental. Una mirada al animal y a sus grandes dientes y cabeza de bulldog nos mueve a reconocer cuán bien le cuadra su denominación científica: *Heterocephalus glaber*, que significa "de cabeza diferente y lampiño".

La rata topo desnuda pertenece a la familia Batiérgidos. Este grupo de roedores africanos está compuesto por cinco géneros (dos de los cuales son solitarios y tres sociales) y por unas 12 especies. Su nombre vulgar induce a engaño. Nuestro roedor ni es lampiño del todo, ni es una rata (roedores de la familia Múridos) ni un topo (orden Insectívoros). Aunque queda mucho por averiguar sobre la historia evolutiva de los Batiérgidos, parece clara su mayor aproximación a los roedores del suborden Histricomorfos, que comprende los conejillos de Indias, las chinchillas y los puercoespines.

Todos los Batiérgidos son de hábitos subterráneos, para cuya vida han desarrollado diversas adaptaciones: cuerpo cilíndrico, extremidades cortas, piel floja, ojos chiquitines, minúsculos pabellones auriculares y enormes incisivos para excavar. Theodore Grand, del Parque Zoológico Nacional, ha comprobado que el 25 por ciento de la masa muscular de una rata topo desnuda se concentra en la región mandibular; ello le permite abrirse camino a través de terreno duro (que, en algunos laboratorios, incluye plástico grueso y cemento). A modo de comparación, en la mandíbula humana no se halla ni siquiera el 1 por ciento de la masa muscular del cuerpo; la pierna contiene alrededor del 25 por cien.

La rata topo desnuda es el único batiérgido que carece de un pelaje corporal completo, lo que significa que carece de un buen aislante; sí posee, no obstante, flecos de pelo en los labios, entre los dedos de sus pies traseros y sobre la cola, así como vibrisas (pelos que sirven de órganos sensoriales) dispersas sobre su hocico. La falta de pelo coevolucionó probablemente con la vida en grupo: se limitan, por un lado, las oportunidades para los ectoparásitos, como los ácaros, que infestan a todos los mamíferos sociales con pelo, y, por otro, se absorbe mejor el calor de los compañeros de colonia.

Apartándose de lo que es propio de los mamíferos, la temperatura corporal de una rata topo desnuda fluctúa con la temperatura ambiente. Rochelle Buffenstein y Shlomo Ya-



hav, de la Universidad sudafricana de Witwatersrand, encontraron que como resultado del elevado intercambio de calor, del reducido tamaño corporal y de tasas bajas de producción de calor metabólico, las ratas topo desnudas son poiquilotermas, o de sangre fría. En la naturaleza, viven en un ambiente bastante termoestable: las temperaturas en los túneles profundos, soterrados a unos 50 centímetros de la superficie, permanecen cercanas a los 30 grados Celsius durante todo el año. Las ratas topo desnudas regulan su temperatura corporal mediante el comportamiento, asoleándose en el suelo caliente cerca de la superficie o bien amontonándose durante los cortos períodos de frío.

Nuestro animal es un excavador prodigioso. Robert A. Brett, adscrito ahora al Servicio de Vida Salvaje de Kenia, estudió una colonia de 87 individuos en el Parque Nacional keniata del Tsavo occidental. De acuerdo con sus registros, en un mes promedio, la colonia excavó más de 200 metros de madrigueras que tenían de cuatro a siete centímetros de diámetro. En la tarea, expulsaron más de 350 kilogramos de suelo a través de unas 40 aberturas en la superficie. Toda esta excavación produce intrincados sistemas de túneles conectados y de cámaras de nidificación múltiples del tamaño de un balón de fútbol; los habitantes deambulan de un nido a otro, utilizando el que está más cerca de su provisión de alimento momentánea.

Los sistemas de madrigueras pueden alcanzar proporciones sorprendentes. Brett colocó radiotransmisores a varios individuos de su colonia experimental y los seguía en sus correrías subterráneas. Descubrió que la red se extendía más de 3,0 kilómetros de longitud y abarcaba una superficie de más de 100.000 metros cuadrados, aproximadamente el tamaño de 10 campos de fútbol. Las colonias construyen semejantes sistemas de madrigueras cincelando los suelos rojizos, ricos en hierro y aluminio, de los semidesiertos de Kenia, Etiopía y Somalia. Sin ser raras, las ratas topo desnudas no se dejan ver con facilidad. Las únicas pistas que denuncian su presencia son unos pequeños montículos de tierra con aspecto de volcán, que, en los momentos más frescos del día, entran en "erupción", al expeler los animales la tierra removida en las excavaciones.

Por lo general, la excavación es tarea cooperativa. Los animales se alinean, cabeza contra cola, detrás del que está royendo la tierra al final del túnel en perforación. El montón de tierra que el de cabeza va dejando comienza a acarrearlo el segundo a través del sistema de túneles, frecuentemente barriéndolo hacia atrás con sus pies traseros. Los compañeros de la colonia se ponen de puntillas para que pase por debajo el que transporta la tierra. Luego, a su vez, cada uno toma el relevo al final de la línea. Al llegar, por fin, a una abertura de la superficie, el individuo barre su carga a un compañero corpulento allí apostado. El "volcanero" expulsa el polvo en un fino roción, mediante fuertes patadas de sus pies traseros, mientras que aquél se agrega a la cinta transportadora viva.

2. RED DE TUNELES que se extiende por muchos kilómetros, conectando los tubérculos de los que las ratas topo desnudas se alimentan (*recuadro de la derecha*). Los animales hacen nuevos nidos cerca de su fuente de alimento actual. Cuando las ratas topo se han comido la parte interna del tubérculo, lo rellenan con tierra removida. Con el tiempo, el tubérculo se regenera. Si una serpiente penetra en la entrada de un túnel y ataca a una rata topo, los obreros sellan todas las entradas en cuestión de minutos (*recuadro de la izquierda*).

En buena medida, la excavación de túneles tiene por finalidad encontrar alimento. Comen los tubérculos suculentos de los geófitos (plantas perennes que almacenan agua, azúcares y almidón en raíces engrosadas que les permiten sobrevivir durante las estaciones secas bienales africanas). La mayoría de los geófitos tienen una distribución irregular o en manchas. Las ratas topo excavan ciegamente en busca de tales acúmulos, incapaces, diríase, de detectar las plantas a través del suelo requemado. Brett observó que a veces comían sólo las partes centrales de grandes tubérculos y dejaban intactas las capas externas; rellenaban luego la parte vaciada con tierra excavada. Andando el tiempo, el tubérculo se regenera y la colonia vuelve a alimentarse de él.

Allí donde abunda el alimento, se congregan las colonias, grandes y separadas entre sí de 10 a 20 metros, y los individuos componentes adquieren cierto peso (de 30 a 40 gramos cada uno); por contraste, en lugares menos abastecidos se recorta el tamaño de las colonias, se dilata (más de un kilómetro) la distancia entre colonias y los individuos adultos pesan sólo de 17 a 28 gramos.

Como los termes, las ratas topo desnudas digieren la celulosa con ayuda de microorganismos que habitan en su intestino. También como los termes, producen dos tipos de cagarrutas fecales: las de un tipo se depositan en una cámara-retrete común; las del otro son reingeridas. Las cagarrutas de este último tipo son buscadas y consumidas por la hembra que cría y por los cachorros. Las cagarrutas blandas, muy nutritivas, dan cobijo a microorganismos cruciales para la digestión.

Las ratas topo desnudas forman colonias de tamaño respetable. En la naturaleza, los grupos suelen constar de 75 a 80 animales, aunque se han desenterrado colonias de más de 250 individuos. No hay ningún otro batiérgido, ningún otro mamífero en realidad, que viva de forma permanente en grupos sociales integrados de esa talla, sea en el interior de un sistema de madrigueras o en otro domicilio. En las colonias predomina el número de machos: en un total de 26 colonias, el número de aquéllos multiplicaba 1,4 veces el número de las hembras. Ignoramos el motivo de esa proporción sexual sesgada.

Para conocer in situ los sistemas de madrigueras y las fuentes de alimento podemos excavar el suelo. Pero no nos es posible registrar en el campo los pormenores del com-

ciente observación se ha comprobado que machos y hembras intervienen en las tareas, aunque no todos los individuos por igual. El papel principal de los reproductores consiste en engendrar, alimentar a los cachorros y mantenerlos limpios. Los no reproductores ayudan a limpiar y a transportar a las crías; les cumple también mantener y defender el sistema de túneles de la colonia. El trabajo se reparte en función del tamaño. Los no reproductores pequeños de ambos sexos realizan labores de mantenimiento: remover el suelo, construir el nido con raicillas y corteza, buscar comida, acarrearla hasta el nido y mantener los túneles libres de raíces, guijarros y otros restos.

Al principio, parecía que los no reproductores de cierta talla hacían poca cosa: cuando no se hallaban excavando nuevos túneles o expulsando tierra holgazaneaban en el nido. Pero Sherman, coautor del artículo, y Eileen A. Lacey, actualmente en la Universidad de California en Davis, les descubrieron una misión importante. Si una serpiente, el principal depredador de una rata topo, penetra en un volcán, esos obreros corpulentos la atacan, dispuestos a matarla o cubrirla de tierra y sepultarla; les corresponde también defender la colonia contra las intrusiones de miembros de otras.

En algunos insectos sociales, así en las abejas melíferas, los roles conductuales cambian con la edad, fenómeno éste que recibe el nombre de polietismo. En las ratas topo desnudas, el polietismo se funda en la talla. Los juveniles de dos a tres meses se incorporan a la fuerza laboral de la colonia en calidad de especialistas en mantenimiento. Más tarde, pueden convertirse en defensores de la colonia y, a veces, en reproductores. El ejemplar que, de pequeño, es un buscador de comida especialmente rápido y habilidoso, capaz de pasar incluso a través de los lugares más estrechos, se transforma, con la edad, en poderoso defensor de la colonia y volcanero.

M. Justin O'Riain, de la Universidad de Ciudad del Cabo, ha descubierto que algunos miembros de la colonia permanecen estancados en su talla mucho más tiempo que otros. Parece, en efecto, que las condiciones sociales de partida y la historia reproductora de la colonia afectan a la tasa de crecimiento de un obrero, a su papel preciso en la fuerza laboral de una colonia y a su eventual trayectoria reproductora.

La comunicación resulta impres-





3. REINA DE RATA TOPO DESNUDA; mantiene su dominancia y la laboriosidad de los demás azuzando o amenazando a los individuos mientras patrulla por los túneles (*arriba*). En este caso, el obrero se encogió sumiso, en una postura característica (*abajo*), hasta varios minutos después de la visita real.

portamiento social de nuestro animal. Para ello hay que capturar colonias enteras y trasladarlas al laboratorio. Se les coloca en sistemas de túneles artificiales, preparados en habitaciones tranquilas, cálidas y húmedas. Se marca cada individuo con un tatuaje distintivo que sirva para reconocerlo. Las ratas topo se habitúan bien a la cautividad, y las colonias se reproducen regularmente; algunos individuos sobreviven incluso después de 18 años en cautividad.

Tras centenares de horas de pa-

cindible para la integración y la coordinación de la colonia. Las ratas topo desnudas utilizan diversas formas de emitir señales: químicas, táctiles y acústicas. John W. Pepper y colegas suyos de las universidades de Michigan y Cornell han registrado 17 categorías distintas de vocalización. Hay sonidos especiales de alarma, reclutamiento y defensa, ruidos de contacto y agresión y gritos exclusivos de los reproductores (durante el apareamiento o la micción) o de las crías hambrientas o menesterosas de auxilio. Su repertorio vocal, el más extenso de los conocidos en los roedores, rivaliza con el de algunos primates por su riqueza.

Hasta aquí nos hemos limitado a las manifestaciones de cooperación en una colonia de ratas topo desnudas. Pero, tras esa fachada de cooperación y comunicación, la competencia acecha. En su mayoría, las conductas relacionadas con este último factor no son estridentes: ligeros empujones repartidos para conseguir los mejores sitios para dormir; a veces, sin embargo, se desencadenan peleas ruidosas por el acceso a los lugares de alimentación o de excavación. Michelle Rymond, de Michigan, y John Schieffelin, de Cornell, cuantificaron las interacciones agonísticas y encontraron fuertes jerarquías de dominancia en el interior de las colonias. La reina y los machos reproductores dominan a los no reproductores, y los obreros mayores dominan a los menores, con independencia del sexo.

No son raros los conflictos graves, con la reina de habitual instigadora. Siendo el individuo más activo y agresivo de la colonia, se la ve patrullar por su dominio, empujando y aguijoneando a los demás. Sherman, coautor del artículo, y Hudson K. Reeve, hoy en la Universidad de Harvard, comprobaron que azuzaba a los individuos perezosos, corpulentos y menos emparentados con una frecuencia mayor que hacía lo propio con los pequeños o genéticamente más próximos. La rudeza de la reina sube de tono cuando aumenta la disponibilidad de nuevos recursos (comida o material para los nidos), señal de que su agresión espolea el trabajo de los demás. Los individuos que reciben sus empujones se tornan activos y participan con mayor afán en las tareas de mantenimiento.

La agresión real sirve, asimismo, para sostener su posición reproductora. Cuando enferma o muere la reina, inmediatamente una o varias hembras empiezan a ganar peso. Se asiste entonces a embestidas entre las reproductoras en potencia, que a veces se transforman en sangrientas batallas; menudean los ataques de hembras que se cruzan en el camino. La calma no retorna hasta que una logra matar, lisiar o intimidar de manera suficiente a sus rivales.

También se dan conflictos entre colonias. En el laboratorio, cuando una de ellas irrumpe en el sistema de túneles de otra colonia, los obreros corpulentos defienden agresivamente su madriguera. Abren amenazadoramente la boca y se encaraman, a veces, uno sobre otro, para bloquear el paso con dos ringleras de furia sibilante y mordedora. Luego, sellarán con tierra la brecha abierta entre las dos madrigueras. Se desconoce qué ocurre si se encuentran en la naturaleza.

Pero el aspecto más intrigante del comportamiento de este animal reside en la exclusividad de la reproducción. De 53 colonias cautivas estudiadas en Sudáfrica, los Estados Unidos e Inglaterra, el 89 por ciento albergaban una sola hembra reproductora; el 93 por ciento de 26 colonias en la naturaleza contaban, asimismo, con una única reina. Obviamente, la regla es sólo una reina, pero se desconoce por qué a veces dos hembras pueden reproducirse al mismo tiempo.

Las hembras que no intervienen en la reproducción tienen aletargada esa función, pero no presentan esterilidad permanente; aunque la mayoría de ellas tienen los conductos genitales y ovarios subdesarrollados, conservan la capacidad de reproducirse si surge la oportunidad. Esta capacidad se conocía en distintos insectos eusociales, en particular en las especies de avispas y abejas que viven en pequeñas colonias y donde las obreras alcanzan una probabilidad numérica razonable de reproducirse si muere la reina. La esterilidad fisiológica es peculiar de las hembras de hormigas y termes, que viven en colonias ingentes, y donde las probabilidades de que se conviertan en reproductoras resultan despreciables.

En el laboratorio, se han convertido en reinas lo mismo a hembras jóvenes (de siete meses y medio) que a maduras (ocho años). En la naturaleza, las nuevas reinas se reclutan tanto de las filas de los miembros pequeños de la colonia como de las líneas de los corpulentos. El paso de obrera a reina implica algo más que un simple cambio de comportamiento. La reina acostumbra destacar sobre todos por su corpulencia y constituye la única hembra cuyas 10 a 14 tetillas son siempre prominentes. Se distingue, además, por la morfología alargada de su cuerpo, causada, según descubrió Buffenstein, por el alargamiento de las vértebras subsecuente a su nuevo estado de reproductora, fenómeno que es exclusivo entre los mamíferos. Así alargado su cuerpo, la reina puede gestar grandes camadas sin engrosarse, lo que le impediría moverse por los túneles.



4. CRIAS DE RATA TOPO DESNUDA, alimentadas por su madre hasta que tienen aproximadamente un mes de edad. Es típico que otros miembros de la colonia se amontonen con la reina y las crías.

A diferencia de lo que ocurre con las hembras, la mayoría de los machos poseen gónadas activas, aunque sólo se apareen algunos. Cuando un reproductor muere, otro, de edad comprendida entre uno y ocho años, le reemplaza. Curiosamente, los machos no suelen luchar por los favores de la reina en estro, en parte porque aparta a empellones a los litigantes y con ello suprime la competencia por el apareamiento. Además, el macho cuenta con mayores probabilidades de reproducirse que la hembra, pues la reina se aparea hasta con tres por período de estro.

Acontece también que los machos inician su deterioro físico en cuanto intervienen en la reproducción. Se ignora el motivo de dicha senescencia. Por consiguiente, y debido a la tasa de renovación relativamente alta de los machos reproductores, el individuo se encuentra en mejor posición si espera otra oportunidad reproductora que si se arriesga a una herida grave en una lucha por un único apareamiento.

La supresión de la reproducción la establece el comportamiento de la reina. (Ocurre igual en varias especies de abejas y avispas.) Los experimentos realizados por Christopher G. Faulkes y sus colegas, de la Sociedad Zoológica de Londres, han demostrado que las obreras se reproducen en cuanto se les aísla de su reina, aun cuando la cama de restos y las heces de ésta denuncien su proximidad. Diríase que la reina percibe cambios sutiles en los niveles de estrógeno de la orina de sus obreras, que preludian la reproducción; advertida, empuja selectivamente a las reproductoras en potencia, provocando estrés fisiológico y anestro en las hembras subordinadas.

Justo antes de parir, corpulenta y torpe de movimientos, la reina pierde parte de su control. Según ha demostrado Jarvis, coautora del artículo, no puede entonces hostigar a las hembras que muestran síntomas hormonales de disposición reproductora. Tras el alumbramiento, recupera rápidamente el dominio de la situación. Pero si muere durante el parto, su sucesora estará lista para aparearse en pocas semanas.

Convertida en reproductora, engendra camadas durante todo el año, dentro de cuyo intervalo se muestra sexualmente receptiva 4 o 5 veces. Entra en estro durante la lactancia, entre los ocho y los 11 días después del parto. Después inicia todas las cópulas y se aparea repetidamente con el macho o machos reproductores.

La gestación dura unas 11 semanas y la lactancia otras cuatro. Justo antes del parto, los pezones de los individuos de la colonia, machos y hembras, suelen hincharse. Se desconoce el motivo, pues los animales no reproductores nunca alimentan a las crías. El engrosamiento mamario quizás indique el estado nutricional de la colonia o su preparación fisiológica para los nacimientos inminentes.



5. INCISIVOS DE RATA TOPO; permiten al animal roer el suelo duro como la roca. La región cefálica de este mamífero contiene el 25 por ciento de su masa muscular. Los pelos dispersos sobre su hocico sirven de órganos sensoriales; el roedor carece prácticamente de pabellones auriculares.

Las camadas son muy numerosas. Por término medio la reina alumbra 14 cachorros por parto en el campo y 12 en cautividad. Una hembra cautiva tuvo 27 crías en una misma camada y 108 cachorros, en cinco camadas distintas, en un año. La reina puede parir tantas crías porque todas sus necesidades están cubiertas por los demás.

Concluido el parto, la colonia se amontona con ellas en la cámara del nido. Las crías parecen adultos en miniatura y pueden arrastrarse el mismo día en que nacen. También son buenos trepadores. O'Riain ha observado que tienen geotactismo positivo (es decir, que trepan hacia arriba), lo que les permite situarse sobre el montón de adultos. Desde aquí buscan activamente a su madre cuando ésta entra en el nido. Al principio, las crías pasan su tiempo mamando y durmiendo. Cuando rondan las dos semanas, empiezan a pedir cagarrutas. Los cachorros comen sus geófitos a las dos o tres semanas de edad. Al mes ya están correteando por el sistema de galerías.

La exclusividad de apareamiento conduce a un similaridad genética extrema en el interior de la colonia. El equipo de Rodney L. Honeycutt, de la Universidad A & M de Texas, comprobó que en regiones geográficas pequeñas había poca variabilidad genética dentro de una misma colonia, para aumentar algo más de una a otra.

Utilizando métodos de identificación "dactilar" del ADN, Faulkes, Reeve y sus colegas investigaron la estructura genética de las colonias. Descubrieron que los individuos de una colonia poseían una distancia genética mucho menor que los no emparentados de otras especies silvestres de vertebrados. Así, el grado de parentesco entre los componentes de una colonia era, en promedio, de 0,81, bastante más afines, pues, que los hermanos de padre y madre en especies exogámicas, que tienen un grado de parentesco promedio de 0,50. Tan elevada proximidad genética se atribuye a la descendencia de los mismos padres y a la permanencia de los juveniles en su colonia natal para reproducirse, en lugar de dispersarse. En ese contexto, se estima que un 85 por ciento de los apareamientos se producen entre padres e hijos o entre hermanos.

La distancia genética se acentúa, sin embargo, entre colonias alejadas. Por citar algún ejemplo, las colonias de Kenia septentrional y meridional, separadas por unos 300 kilómetros,

difieren tanto como las subespecies de otros roedores. Se ha registrado una divergencia genética similar en mamíferos subterráneos, causada, al parecer, por la combinación de un modo de vida sedentario y de extinciones con episodios de recolonización por grupos cercanos. Debido a su pobre variabilidad genética, las colonias de ratas topo desnudas pueden ser particularmente sensibles a la acción exterminadora de nuevas enfermedades.

Desde 1986, Braude, coautor del artículo, ha capturado, marcado y soltado a unos 4000 ejemplares de 30 colonias en el Parque Nacional keniata de Meru. Empleó una trampa en forma de túnel, que se dispara electrónicamente. Analizando la recaptura anual, comprobó que los individuos desaparecían a una tasa rapidísima. La verdad es que eran muy pocos los recapturados más de un año. En seis colonias estudiadas durante cuatro años, del 21 al 80 por ciento de los residentes iniciales persistían un año más tarde, pero sólo del 2 al 15 por ciento estaban presentes a los dos años, y únicamente quedaba del 1 al 2 por ciento después de tres años.

Importa resaltar que la probabilidad de que una reina permaneciera de un año al siguiente doblaba la de un obrero: un 93 por ciento frente a un 43 por ciento. Observaciones directas de ataques de serpientes, el hallazgo de ratas topo en el estómago de ofidios y las señales de mordeduras y extremidades perdidas en algunos ejemplares capturados indican que la depredación es una causa importante de mortalidad.

La dispersión que logra triunfar parece ser un fenómeno raro. A pesar de la exhaustividad del rastreo, contados fueron, de los cientos marcados, los que aparecieron en otras colonias. Ignoramos el proceso inaugurador de nuevas colonias. Por un lado, Brett sugiere que las colonias grandes se dividen para constituir otras nuevas, apoyándose en el tamaño notable (25 individuos) de la comunidad más pequeña desenterrada. La fisión de una colonia se ha observado en el laboratorio de Sherman; en 1991, Braude la presenció en la propia naturaleza. En otro orden, la recuperación de una pareja solitaria lejos de cualquier posible colonia de origen da pie a suponer que pueden dispersarse por doquier.

Las razones evolutivas aportadas para explicar la eusocialidad de los insectos se han centrado en los factores genéticos (haplodiplodía). Para dar cuenta de la reproducción cooperativa en mamíferos y aves, sin embargo, se ha hecho hincapié en los factores ecológicos; se apela al papel que desempeña un hábitat reproductor limitado y que fuerza a los jóvenes a permanecer en casa, en vez de dispersarse y reproducirse por su lado. El reconocimiento de esa dualidad no vela el estrecho paralelismo entre la estructura social de las ratas topo desnudas y la que caracteriza a muchos insectos sociales.

Nuestro trabajo permite tender un puente entre la explicación de la eusocialidad de los invertebrados y la de la eusocialidad de los vertebrados. Entendemos que las ratas topo viven en grupos debido a varios factores ecológicos. El rigor del medio, la distribución de la comida en manchas y la dificultad de excavar un suelo seco y duro, así como la depredación intensa, hacen que la dispersión y la reproducción independiente sean casi imposibles.

Al cooperar en la construcción, mantenimiento y defensa de una fortaleza subterránea rica en alimento, cada individuo refuerza su propia supervivencia. Obligada la hembra joven a permanecer en casa, su reproducción personal es restringida por su poderosa madre. Por tanto, la única opción reproductora que le queda es la de criar a sus hermanos. Puesto que la reina se especializa en la reproducción, en una colonia nacen muchas más crías de las que cualquier hembra podría parir por sí sola. Debido a la endogamia, el parentesco genético entre hermanos es altísimo y así, como señaló Hamilton para los himenópteros eusociales, a un obrero de rata topo desnuda le reporta beneficios genéticos ayudarlos.

Ante semejante grado de altruismo y cooperación, algunos biólogos ven en la eusocialidad un hito de la evolución social. Como demuestra la eusocialidad de las ratas topo desnudas, la fealdad es sólo epidérmica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EUSOCIALITY IN A MAMMAL: COOPERATIVE BREEDING IN NAKED MOLE-RAT COLONIES. Jennifer U. M. Jarvis en *Science*, vol. 212, n.º 4494, págs. 571-573; 1 de mayo de 1981.

THE EVOLUTION OF EUSOCIALITY. Malte Andersson en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 15, págs. 165-189; 1984.

THE BIOLOGY OF THE NAKED MOLE-RAT. Dirigido por Paul W. Sherman, Jennifer U. M. Jarvis y Richard D. Alexander. Princeton University Press, 1991.

La evolución cobra vida

La reconstrucción de humanos extintos para devolverles el aspecto que tuvieron en vida plantea problemas insólitos y embarazosos a los paleontólogos, habituados a interpretar la evolución a partir únicamente de huesos y dientes

Ian Tattersall

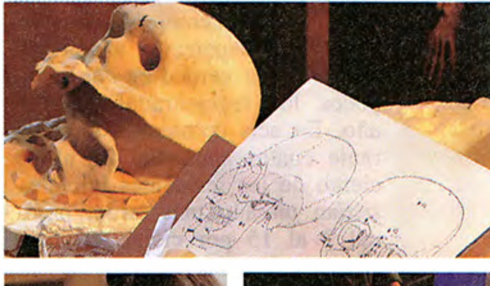
Los huesos antiguos constituyen las pruebas objetivas de la historia biológica. Vistos desde mi atalaya, la paleontología, proporcionan muchísima más información acerca de las criaturas extintas que las reconstrucciones o los modelos, en cuya creación el arte desempeña papel no menos importante que la ciencia. Pero soy también conservador de museo y desde tal perspectiva tengo clara conciencia de que, a los ojos del público, nada confiere tanta vitalidad al pasado como una reconstrucción bien concebida.

Cuando me fue conferida la responsabilidad de conservador de la nueva Sala de Biología y Evolución Humana del Museo Americano de Historia Natural, tanto a Willard Whitson, quien diseñó la sala, como a quien escribe se nos hizo evidente que necesitábamos incluir algunas reconstrucciones de los primeros humanos. Queríamos además exponer tales figuras de forma dinámica, en el contexto de situaciones que nuestros antepasados hubieron debido afrontar. Unicamente así podríamos devolverles un remedo de vida. Confiábamos en que la conjunción de un esculpido perspicaz con los materiales modernos de moldeado permitiesen alcanzar un nivel de realismo que rivalizase con los espectaculares dioramas de animales modernos exhibidos en las galerías contiguas.

No me imaginaba el número infinito de embarazosas decisiones que iban a ser necesarias conforme progresaba el trabajo. Los científicos estamos habituados a tratar de cuestiones objetivas; lo que más satisfacción nos causa es alcanzar resultados fundados en realidades verificables; las especulaciones no verificables nos crean extrema desazón. Pero tales especulaciones son inevitables en toda tentativa de exhibición de especies humanas extintas.

Habíamos decidido recrear tres distintas especies de







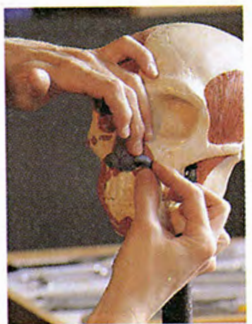




1. CRANEOS Y HUESOS NEANDERTALES ofrecen la única prueba física directa del aspecto que pudieran ofrecer aquellas gentes extintas. Trabajando a partir de reproducciones de fósiles fragmentados, Gary Sawyer esculpe un cráneo y saca un molde. El cráneo recreado a partir del molde sirve de base para el trabajo de reconstrucción ulterior.

IAN TATTERSALL es paleontólogo y primatólogo. Ha trabajado en lémures vivos y subfósiles de Madagascar, así como en evolución temprana de humanos y primates. Conservador y director del departamento de antropología del Museo Americano de Historia Natural, le interesa especialmente la integración de la teoría evolucionista con el registro fósil.

















antepasados humanos, remontándonos varios millones de años en la evolución. De ellas, la más reciente es *Homo neanderthalensis* que mostramos en un asentamiento en Francia, donde vivieron los neandertales hace unos 50.000 años. (Aunque muchos paleontólogos, entre quienes me cuento, están convencidos de que los neandertales eran especie distinta del *Homo sapiens* moderno, algunos todavía disienten en este punto.)

La primera cuestión a decidir —qué podrían estar haciendo los tres individuos de la escena— fue la más sencilla, pues los paleontólogos hemos podido averiguar mucho acerca de la forma de vida de los neandertales. Por ejemplo, el peculiar desgaste que muestran sus utensilios de piedra nos informa de que usaban pedernales para cortar palos y raspar pieles. Optamos por presentar un individuo macho afilando una lanza de madera, mientras una hembra joven raspaba una piel y otra más vieja la aconsejaba. Dado que los incisivos de los neandertales suelen estar muy desgastados, nos pareció que pisábamos sobre seguro al mostrar a la joven sujetando entre los dientes una punta de la piel.

Para mayor realismo en los cuerpos de nuestros neandertales, moldeamos sus cuerpos copiando los de modelos humanos vivos. Los neandertales eran más robustos que los humanos modernos, pero sus proporciones corporales eran en términos generales similares a las nuestras y durante el modelado se podrían introducir las ligeras diferencias que había entre ellos y nosotros —pues sus pulgares eran más largos y sus omóplatos tenían también distinta forma— que hubieran podido detectarse en un cuerpo de carne.

Se han descubierto numerosos cráneos neandertales bastante completos, que nos dan idea clara de las dimensiones generales de la cabeza. La caja craneana, del tamaño de la nuestra, era elongada, baja y carecía de la elevación frontal del hombre moderno. Tenían el rostro protuberante a lo largo del plano de simetría; grandes fosas nasales y pómulos hundidos. Fuertes arcos supraorbitales defendían las cavidades oculares.

Para determinar el aspecto externo de los rasgos faciales soportados por la calavera, Gary Sawyer, Steve Brois y yo hubimos de enfrentarnos a ciertos problemas con los que no estábamos familiarizados. El modelado de un humano extinto se basa en técnicas y habilidades muy similares a las de los dibujantes y pintores forenses, que reconstruyen los rostros de personas asesinadas y no identificadas. La clave está en que los músculos dejan impresiones reveladoras en los huesos a los que están ligados. A partir del tamaño y profundidad de esas impresiones podemos deducir las dimensiones de los músculos. Trabajando sobre una reproducción de la calavera desnuda, el paleontólogo puede reconstruir capa por capa los tejidos blandos suprayacentes, empezando por los tejidos profundos y procediendo hacia afuera.

2. MUSCULATURA, tejido adiposo y demás rasgos se van agregando cuidadosamente a la reproducción del cráneo neandertal, capa tras capa, a partir del hueso. Aunque no han llegado a nuestros días fósiles de estos tejidos, cabe inferir sus proporciones basándonos en las señales dejadas en el cráneo. Al final se aplica una película de plástico para crear una falsa dermis sobre la cabeza. Para el modelado del cuerpo nos ayudamos de moldes en escayola tomados de personas vivas. (Vemos el proceso de moldeado de una mano.) Ni la reconstrucción de la cabeza ni los vaciados del cuerpo pasaron a ser parte de la figura terminada; Cathy Leone y otros artistas las utilizaron como base para preparar un molde anatómicamente preciso de un neandertal completo. La figura de la exhibición, en plástico, fue vaciada a partir de ese molde.

Sin embargo, los artistas forenses disponen de una gran ventaja, ya que pueden estudiar la anatomía blanda de personas vivas. Los paleontólogos no disponen de neandertales vivos que les sirvan de referencia. Consiguientemente, la forma de la nariz, los labios, las orejas y otros rasgos esenciales para determinar el carácter de un rostro neandertal no pasan de ser conjeturas más o menos verosímiles.

Pero las decisiones arbitrarias apenas si estaban comenzando. En otros tiempos me hubiera echado a reír si alguien me pronosticara que el aspecto de las cejas de un neandertal iba a causarme semanas de agobio. ¿Tendrían cejas, cuando menos? (Nuestros parientes vivos más cercanos, los chimpancés, carecen de ellas.) Si los neandertales tenían cejas, ¿en qúe lugar de aquellos bulbosos arcos supraorbitales se encontraban? De igual modo, ¿hasta dónde habrían crecido sus barbas, que mal hubieran podido recortar? ¿Cuánta pilosidad corporal tendrían aquellos hombres y mujeres? ¿Cuál sería su color y textura? ¿De qué color era la piel? Todos estos detalles ofrecían interminable ocasión para la cábala.

Fundamos nuestras decisiones definitivas en la mejor información de que disponíamos. La elevada latitud del hábitat de aquellas gentes nos hizo pensar que Cathy Leone y nuestros demás preparadores deberían suponerles piel blanca, como la de los europeos modernos. Dado que el clima europeo era ya frío mucho antes de culminar la última glaciación, ocurrida hace unos 18.000 años,



deberíamos proveerles de una pilosidad corporal bien incursa en el máximo de la variedad humana moderna.

Los humanos del neandertal sabían preparar las pieles y parece prácticamente seguro que usaran vestimenta de piel, mas, ¿de qué clase? Aquellas gentes se extinguieron casi 10.000 años antes de que fueran utilizadas las primeras agujas de coser talladas en hueso; la posibilidad de confeccionar prendas limpiamente cortadas les estaba vedada. Aun así, quedaban abiertas muchas posiblilidades. Cuestiones básicas, como por ejemplo, si el pelo de la piel se llevaba hacia dentro o hacia afuera o si se raspaba por completo, han sido imposibles de responder.

La vestimenta no venía al caso en el segundo diorama, que nos sitúa en la cuenca del Turkana, en Kenya septentrional, hace unos 1,7 millones de años. Ese retablo exhibe un pariente cercano del *Homo erectus* al que probablemente se debería llamar *Homo ergaster* ("hombre que trabaja") pues valíase de utensilios. La decisión de qué actividades representar resultaba en esta escena más problemática que en el caso de los neandertales, al ser muchísimo menos lo que sabemos acerca del comportamiento de los humanos más primitivos.

Sólo teníamos espacio en el diorama para dos figuras; optamos por situar una femenina y una masculina, sin querer sugerir que representasen una familia nuclear, pues no existe ningún indicio de que formasen tales agrupaciones. Para multiplicar nuestras dificultades estaba la incertidumbre de los arqueólogos acerca de que *H. erectus* y sus congéneres fuesen capaces siquiera de caza menor. Nosotros queríamos mostrar el cadáver de un animal grande siendo burdamente despiezado con groseros instrumentos de piedra —sabemos que aquellos seres llegaban hasta ahí—, pero no queríamos dar a entender que habían sido nuestros protagonistas quienes necesariamente habían conseguido la pieza. Al final, acabamos por mostrar a la hembra ahuyentando a una hiena con un trozo de hueso, mientras el macho ataca el cadáver con una lasca de piedra, con la mirada atenta y agresiva en un buitre que los sobrevuela.

Las figuras propiamente dichas resultaron algo menos problemáticas: de cuello abajo eran francamente parecidos a nosotros. Les dotamos de piel oscura, que les hubiera protegido del sol tropical, y poco pilosa, que facilitaría la refrigeración por evaporación del sudor. La reconstrucción de los rostros de aquellas gentes de cerebro menor que el nuestro resultó más compleja que en el caso de los neandertales, al ser mucho mayor la distancia evolutiva que los separa de los humanos modernos.

El tercero muestra la formación de los célebres rastros de pisadas en el yacimiento tanzaniano de Laetoli, hace unos tres millones y medio de años. Un volcán cercano había expelido una nube de ceniza, que tras depositarse en el valle cercano fue mojada por la lluvia. A través de esta superficie lodosa caminaron dos humanos primitivos y posiblemente también un tercero (aunque esto es objeto de debate). Tampoco hay acuerdo sobre la variedad de homínido que imprimió sus huellas, pero el único candidato conocido es *Australopithecus afarensis*, el más antiguo miembro del linaje humano descrito hasta ahora.

Las huellas, endurecidas al secarse el lodo y preservadas milagrosamente hasta nuestros días, muestran la deambulación bípeda de un ser enhiesto, que pasma por su modernidad. Las dos hileras de huellas paralelas corresponden a un individuo grande y otro más pequeño que caminan al mismo paso y tan cerca uno de otro que tuvieron que hallarse en contacto físico. ¿Eran quizás un adulto y un adolescente, o tal vez macho y hembra? Los fósiles muestran que los machos de *A. afarensis* eran bastante mayores que las hembras.

No podemos saberlo a partir de las huellas solamente. Para dar mayor interés visual a la escena optamos otra vez por macho y hembra, con el brazo de aquél cubriendo los hombros de ésta. La pose resultará quizá demasiado antropomórfica para ciertos gustos, pero el escultor inglés John Holmes, en su versión definitiva, plasmó la

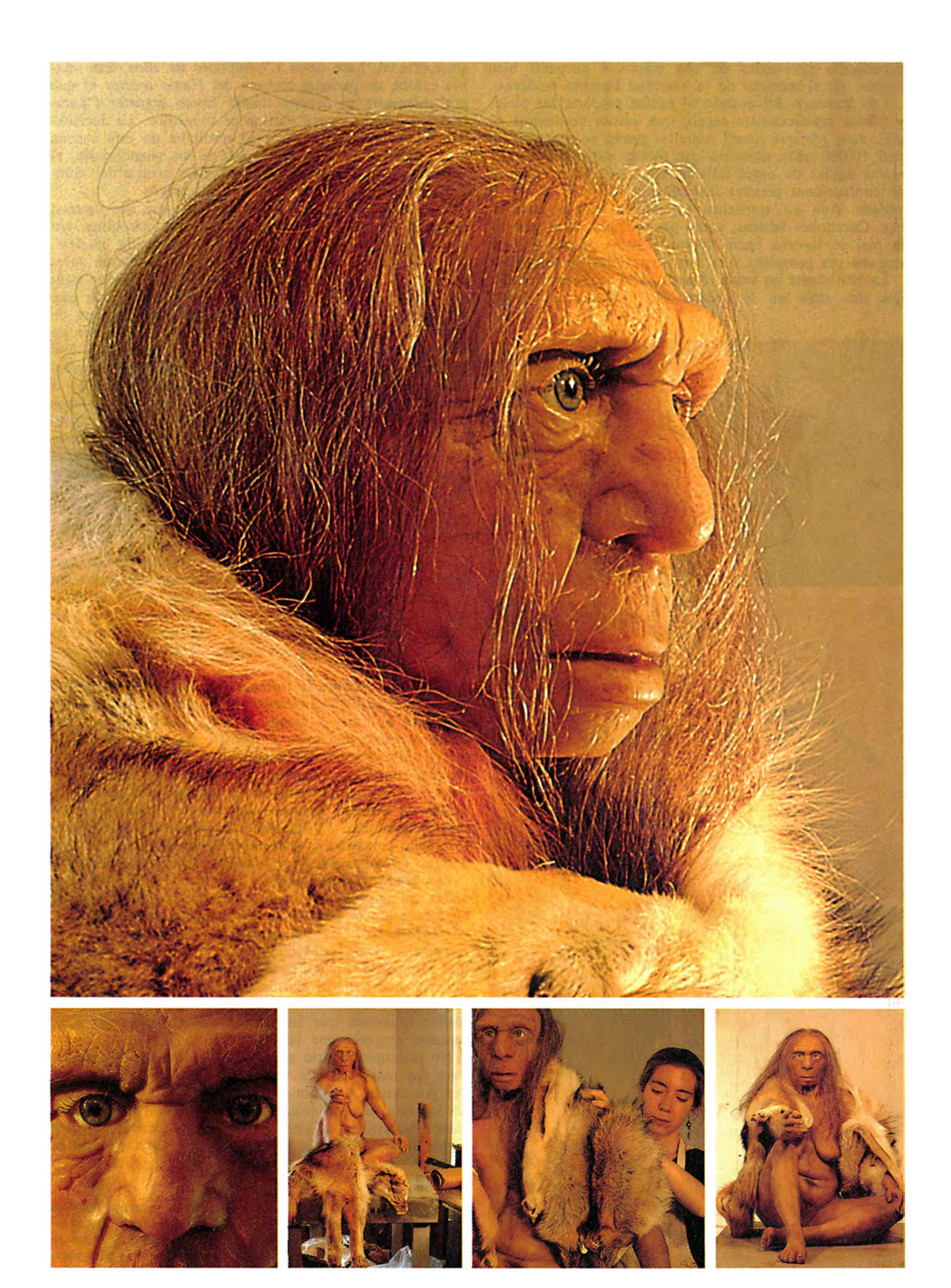








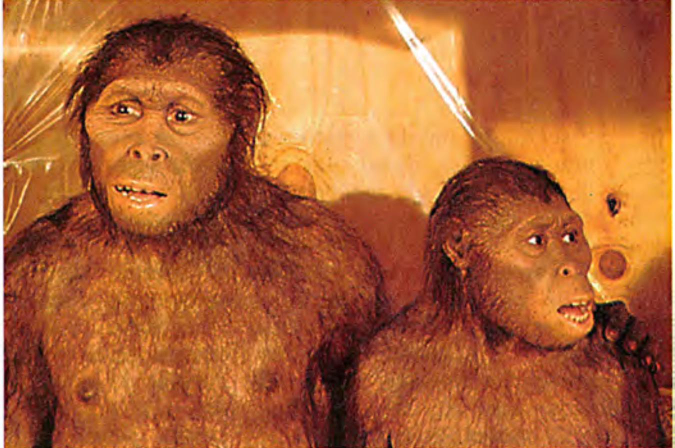
3. PARA REMATAR LA FIGURA los artistas insertan los ojos y sombrean minuciosamente la superficie moldeada buscando máxima verosimilitud. Los cabellos y el vello corporal se insertan pelo por pelo. Se desbastan las uñas de manos y pies para darles la tosquedad adecuada.









escena de Laetoli con tan gran talento y, a nuestro entender, tan elocuente resultado, que, francamente, no nos importó.

No se ha descubierto todavía ninguna cráneo fósil entero de *A. afariensis*. Las reconstrucciones compuestas basadas en fragmentos craneanos revelan que poseía una cabeza bastante similar a la de un chimpancé, con cerebro pequeño y gran cráneo facial. Los rasgos definidos por tejidos blandos planteaban los problemas de siempre, sólo que en forma más aguda. Tuvimos que decidir, por ejemplo, si dar a las figuras la nariz de un chimpancé o algo un poco más humano.

También había que tomar en consideración las muchas incertidumbres sobre la estructura corporal de estos antiquísimos humanos. A partir de los fósiles podríamos inferir que tenían piernas más cortas y pies mayores que los nuestros. De ello cabría deducir que su deambulación difería bastante de la del hombre moderno. Mas tal idea entra en conflicto con las pruebas de las huellas de Laetoli. Atrapados entre los fósiles y las huellas humanoides, nos inclinamos por las últimas.

Tampoco la pigmentación de la piel y la pilosidad corporal son apenas más que conjeturas. *A. afarensis* moraba en los trópicos de Africa oriental mucho después de que el antiguo bosque cediera el paso a la pradera abierta. Es probable que este homínido bípedo explotase la zona, bastante rica, de transición entre la sabana y el bosque. Su piel podría haber estado fuertemente pigmentada para protegerle de la intensa radiación solar del campo abierto, pero si *A. afarensis* pasaba gran parte de su vida a la sombra de los árboles, tal pigmentación podría haber sido menos necesaria. Podría haber tenido el espeso abrigo piloso de los primates del bosque. O también, al igual que nuestra propia especie, adaptada a las sabanas, podría haber trocado su abrigo por un mecanismo que eliminase calor corporal por evaporación del sudor.

Pura y simplemente, no podemos saberlo de cierto. Las figuras de *A. afarensis* creadas por nosotros tienen la piel morena y una cubierta pilosa bastante rala. Ni resultó nada sencillo decidir cuánto habrían de parecerse entre sí macho y hembra de *A. afarensis*. Los chimpancés no presentan diferencias notables de pilosidad facial entre uno y otro sexo; tampoco nuestras figuras.

Se podría concluir que la acumulación de estas decisiones carentes de sólido respaldo científico ha dado por fruto figuras de pura fantasía. No es así. Aunque no arriesgaría la vida por muchos de los detalles que he mencionado, merced a un esculpido cuidadoso y al respeto por las proporciones craneanas y corporales hemos preparado evocaciones de estos humanos extintos que les confieren un hálito de vida sin sacrificar una exactitud científica razonable. Además, mientras los visitantes del Museo Americano de Historia Natural estén contemplando los dioramas, también tendrán ante sí reproducciones de los fósiles auténticos en que se han basado tales recreaciones ¡lo mejor de ambos mundos!

4. MUJER NEANDERTAL, vestida con una piel. Entre las otras reconstrucciones de la exhibición (*arriba*) se cuentan una mujer joven y un varón neandertales (*las figuras de piel clara*), y un par representativo de *Homo erectus* (*figuras de piel oscura*). Willard Whitson desembala las figuras de *Australopithecus afarensis*, hechas en Inglaterra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FLESHING OUT THE PAST: RECONSTRUCTING FOSSIL FACES. Michael Anderson en *Discovery* (Yale Peabody Museum of Natural History), vol. 22, n.º 1, págs. 11-15; 1990.

ALMOST HUMAN. Tom Waters en *Discover*, vol. 11, n.º 5, págs. 42-53; mayo de 1990.

RE-CREATING OUR ANCESTORS. John Neary en *Archaeology*, vol. 44, n.º 1, págs. 64-67; enero/febrero de 1991.

Paradojas de la tonalidad musical

Ciertas series sonoras producen la impresión de un ascenso o descenso infinito de altura tonal. Otras series, que cambian por traslación de clave, reflejan la influencia del habla sobre la percepción musical

Diana Deutsch

La escalinata sin fin constituye una paradoja visual clásica, que engaña al ojo induciéndole a recorrer un periplo geométricamente imposible. Ideada en los años cincuenta por L. S. Penrose y Roger Penrose, de la Universidad de Londres, la paradoja se haría famosa luego gracias al artista holandés M. C. Escher. La paradoja visual tiene abundosa parentela de homólogas acústicas. A comienzos de los sesenta, Roger N. Shepard, de los Laboratorios Bell, produjo ya un ejemplo sobresaliente. Tocó repetidamente una misma secuencia de tonos generados por ordenador, que iban ascendiendo dentro de una escala. En la audición, los sujetos, en lugar de percatarse de que la serie concluía y volvía a comenzar, percibían una secuencia de tonos indefinidamente ascendentes. Al invertir Shepard el orden de la serie tonal, los sujetos oyeron una secuencia que descendía sin fin.

La investigación atinente a la forma en que los individuos perciben secuencias particulares de tonos revela de qué modo se vale el cerebro de diferentes indicios para dar sentido a sonidos ambiguos. Los estudios más recientes inducen a pensar que la percepción de ciertas paradojas musicales guarda relación con el procesamiento del habla. Parece ser que los individuos, durante la infancia, adquieren gradualmente una representación de la altura de los sonidos peculiares de un lenguaje o dialecto. Tales estudios han revelado que existe en los individuos una influencia común sobre la percepción tanto del habla como de la tonalidad musical.

Han caído con ello dogmas de larga tradición, en especial, el concerniente a la equivalencia perceptual de ciertos motivos musicales. Tal presunción afirma que un pasaje musical sigue siendo identificable aun cuando se le presente en una clave distinta de aquella en que fue oído por vez primera. Por el contrario, ciertas paradojas tonales hacen ver que tal principio no es universal; es muy posible que el cerebro interprete de forma distinta las relaciones entre tonos al ser transpuestos de clave. Esta noción resulta tan desconcertante como la idea de que una figura visual pudiera metamorfosearse al ser trasladada a otro punto del espacio.

DIANA DEUTSCH enseña psicología en la Universidad de California en San Diego, donde se doctoró. Inició su formación en la de Oxford. Su trabajo se ha centrado en la percepción del sonido y de la música, sin olvidar los mecanismos nerviosos subyacentes al análisis y representación en la memoria de tales procesos.

Las investigaciones que respaldan estas y otras conclusiones tienen raíces históricas profundas en estudios de física del sonido y de la música. Pitágoras estableció que la altura del tono musical de una cuerda vibrante varía en razón inversa de su longitud: cuanto más corta la cuerda, tanto más aguda la nota. También demostró que ciertos intervalos musicales —la relación de las alturas de dos tonos— se corresponden con razones definidas por diferentes longitudes de cuerda. En el siglo XVII, Galileo y el matemático y teólogo francés Marin Mersenne mostraron que el fundamento de estas asociaciones reside en la relación entre longitud de la cuerda y frecuencia de vibración.

Mersenne puso de manifiesto que en los cuerpos vibrantes existían resonancias o armónicos. Es decir, no sólo se producen vibraciones a la frecuencia correspondiente al tono percibido (la frecuencia fundamental), sino también a frecuencias (armónicos) que son múltiplo entero de la fundamental. Dicho de otro modo, un tono cuya frecuencia fundamental sea de 100 hertz contiene también componentes a 200 hertz, 300 hertz, 400 hertz y así sucesivamente. En el decenio de 1930, Jan Schouten, del Laboratorio Philips en Eindhoven, demostró que el sistema auditivo saca partido de este fenómeno. Cuando nos es presentada una serie armónica, somos capaces de percibir un tono que corresponde a la frecuencia fundamental, aun cuando en el sonido falte precisamente el tono fundamental.

Las relaciones entre alturas tonales nos permiten reconocer motivos musicales. Ante dos tonos, presentados simultáneamente o en sucesión, percibimos un intervalo musical. Los intervalos son de igual tamaño cuando las frecuencias fundamentales de sus tonos componentes guardan la misma relación. (Técnicamente, los tonos comprendidos entre cada par están separados por la misma distancia, medida ésta por el logaritmo de la frecuencia.)

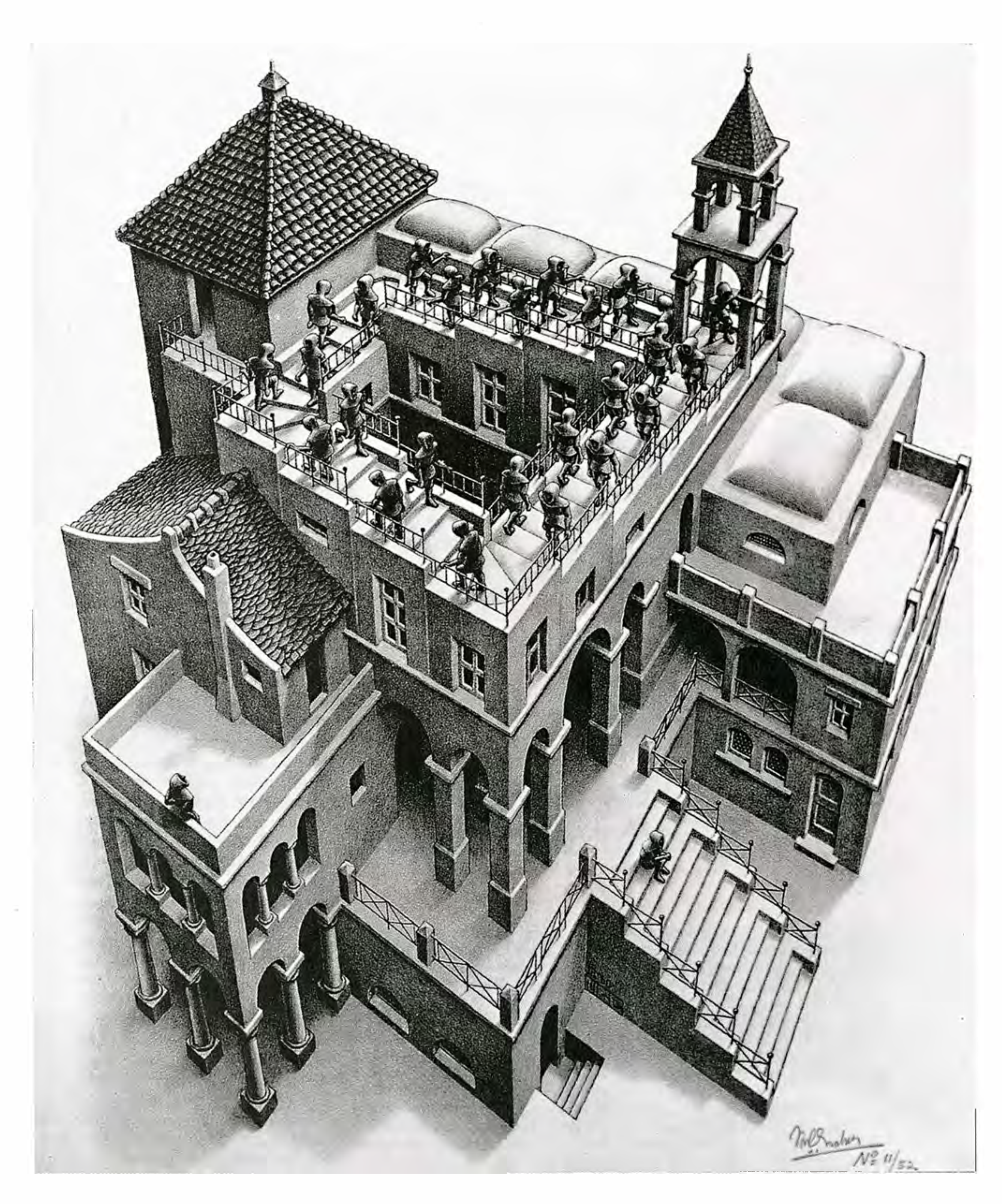
El principio anterior constituye uno de los fundamentos de la escala musical tradicional. La unidad más pequeña de esta escala es el semitono, que es la relación de alturas entre dos notas adyacentes del teclado de un piano. El semitono corresponde aproximadamente a la relación de frecuencias 18:17. Los intervalos que se componen del mismo número de semitonos reciben el mismo nombre. Por ejemplo, el intervalo correspondiente a una razón 2:1 (12 semitonos) se denomina "octava"; el intervalo correspondiente a una razón 3:2, que consta de siete semitonos, se llama una "quinta" y la razón 4:3 (cinco semitonos), una "cuarta".

Los tonos relacionados mediante octavas son, en cierto sentido, perceptualmente equivalentes. Cada uno de los doce semitonos que contiene

1. *ASCENSO Y DESCENSO*, litografía de M. C. Escher. Es una paradoja visual homóloga de la ilusión auditiva creada por una serie de sonidos que parecen elevar o descender indefinidamente su tonalidad.

una octava recibe nombre propio (Do, Do#, Re, etc.). La escala completa, o escala cromática, consiste en la aparición repetitiva de esa serie de notas a través de las octavas. Para distinguir las notas del mismo nombre en distintas escalas se recurre a subíndices; por ejemplo, el Do central del piano puede denotarse Do$_4$; el Do perteneciente a la octava inferior es Do$_3$ y el de la octava superior, Do$_5$.

Se puede considerar que la altura de un sonido varía según dos dimensiones. La primera, conocida por elevación tonal, se extiende de baja a alta; podemos experimentarla pasando el dedo de extremo a extremo del teclado. La segunda dimensión, o "círculo de clases tonales", es la dimensión cíclica de la clase tonal, que define la posición de una nota dentro de una octava; esta idea de dimensión circular lleva a una presunción: que carece de sentido preguntar si un tono, Do, por ejemplo, es más o menos alto que otro, como el Fa#. Para dejar clara la pregunta sería preciso especificar las octavas a que pertenecen los dos tonos.



En ausencia de tal información, el cerebro humano sigue todavía tratando de organizar los tonos, con el fin de juzgar su altura relativa. Shepard puso de manifiesto este fenómeno en 1964. Valiéndose de un programa de síntesis musical desarrollado por su colega Max Mathews, generó una serie de sonidos bien definidos en cuanto a clase tonal, pero en los que no estaba claro a qué octava pertenecía el sonido. Cada sonido consistía en un conjunto de componentes sinusoidales (ondas que oscilan lisa y suavemente) separadas por octavas, con lo que los sonidos estaban compuestos exclusivamente por armónicos de la misma clase tonal.

Shepard halló que, al tocar tales tonos uno tras otro, los sujetos oían una pauta ascendente o descendente. El sentido dependía de la distancia que separaba los dos tonos dentro del círculo de clase tonal; los oyentes seguían la distancia más corta entre los tonos: así, oían el par Do#-Re como ascendente, porque en este caso la distancia más corta es la del sentido horario o dextrógiro; análogamente, el par La-Sol# era siempre percibido como descendente.

Este hallazgo le permitió a Shepard producir la impresionante demostración descrita al principio de este artículo. Una serie sonora que recorra repetidamente el círculo de clases tonales a pasos de sentido dextrógiro parece aumentar de altura indefinidamente; en cambio, si la serie recorre el círculo en pasos de sentido levógiro, da la impresión de un descenso tonal infinito.

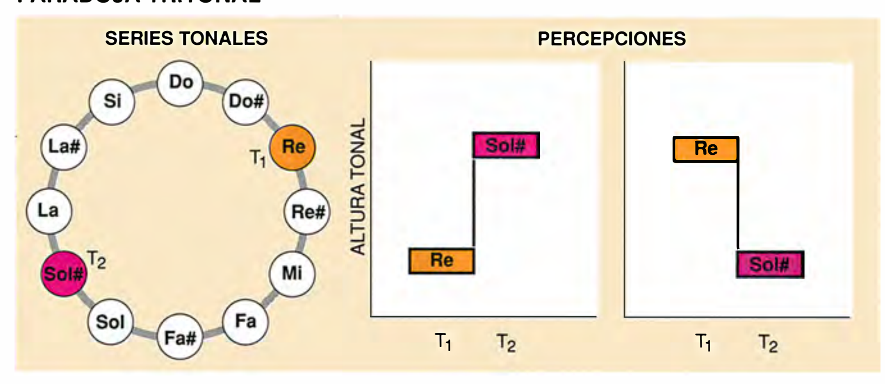
Jean-Claude Risset, de Marsella, ha preparado una variación muy curiosa. Creó un único sonido que iba deslizándose sobre el círculo de clases tonales en sentido dextrógiro. El tono parecía elevarse interminablemente. El deslizamiento levógiro produjo un sonido de altura descendente. Un tono de altura continuamente descendente simbolizaba la caída de la bomba atómica. Risset ha producido también un tono deslizante que parece ascender y descender interminable y simultáneamente y ha incorporado tales sonidos a obras orquestales.

Recientemente he creado en mi laboratorio efectos de circularidad valiéndome de un conjunto de sonidos, cada uno de los cuales constituía una serie armónica completa, pero en la cual las amplitudes relativas (las intensidades o volúmenes sonoros) de los armónicos habían sido determinadas de modo que generasen ambigüedades en la percepción de altura tonal. Los oyentes recibieron la impresión de una serie sonora de tono infinitamente ascendente.

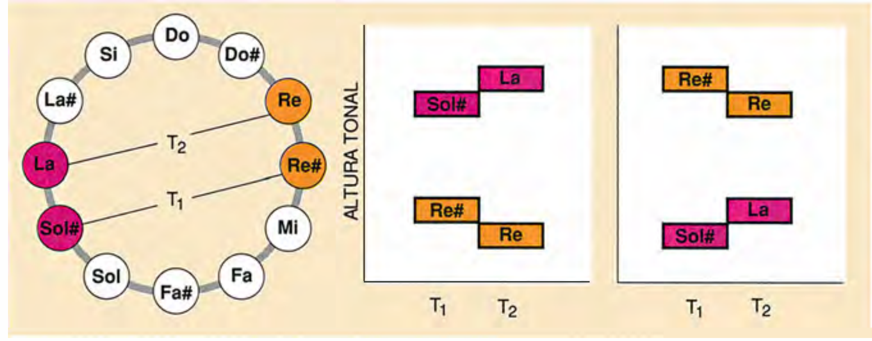
Las demostraciones de circularidad tonal recién descritas ponen de manifiesto que la mente humana propende a formar ligaduras entre elementos próximos y no entre elementos alejados. Podemos hallar fenómenos similares en la visión. Tendemos, por ejemplo, a agrupar los puntos contiguos y a percibir movimiento entre puntos luminosos vecinos encendidos y apagados en sucesión rápida.

¿Qué ocurre, pues, cuando los tonos distan media octava, como Do seguido de Fa# o Sol# seguido de Re? Los pares tonales se encuentran separados la misma distancia en cualquiera de los dos sentidos de recorrido del círculo de clases tonales. En tal intervalo, que se denomina

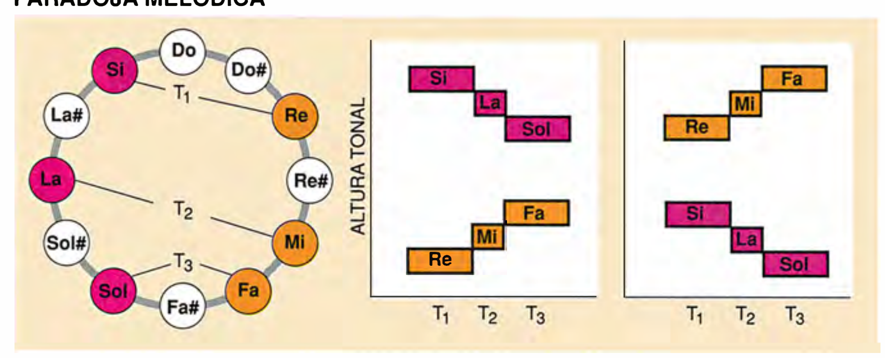
PARADOJA TRITONAL



PARADOJA SEMITONAL



PARADOJA MELODICA



2. SE DAN PARADOJAS MUSICALES cuando una secuencia de tonos parece subir o bajar indefinidamente a pesar de que los tonos carecen de las características físicas normalmente utilizadas para juzgar la tonalidad. Resulta posible comprender tales paradojas con auxilio del círculo de clases tonales, una forma de representación de las notas de una octava. Las notas tocadas hállanse opuestas en el círculo. En un caso particular del fenómeno, denominado "paradoja tritonal", se toca Re durante el tiempo 1 (T_1), seguida de Sol# en el tiempo 2 (T_2). Algunos oyentes entendieron que tal secuencia era ascendente; otros la juzgaron descendente. En una variante, la denominada paradoja semitonal, se presentan simultáneamente Re# y Sol#, seguidas por Re y La. Una tercera versión, la paradoja melódica, se vale de tres pares de notas. En estos casos, ciertos sujetos percibieron en la secuencia ascendente una tonalidad más aguda que en la descendente, mientras otros la juzgaron más grave. Los resultados indican que, en lo tocante a altura sonora, los sujetos tienen necesariamente orientaciones preferidas del círculo de clases tonales.

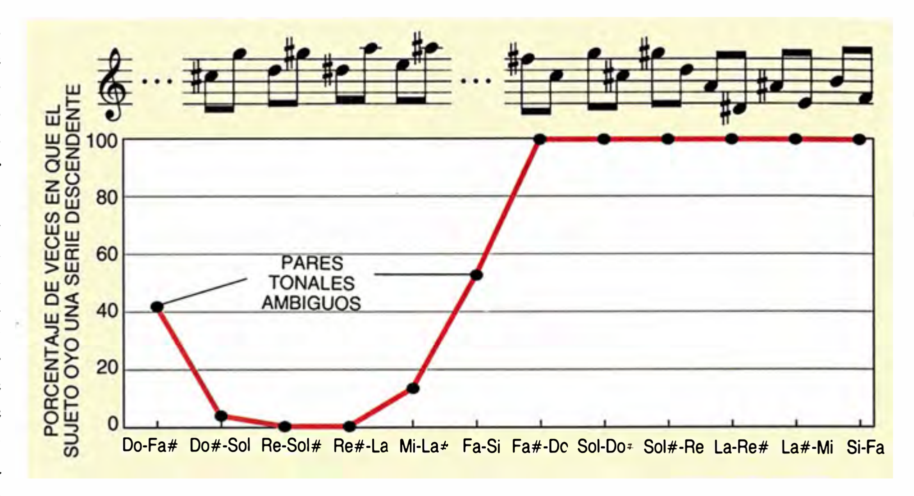
un tritono, el oyente no puede recurrir a la proximidad para formarse juicios relativos a pares tonales. ¿Serán, entonces, ambiguas las percepciones de altura relativa, o se recurrirá a algún otro principio para evitar la ambigüedad?

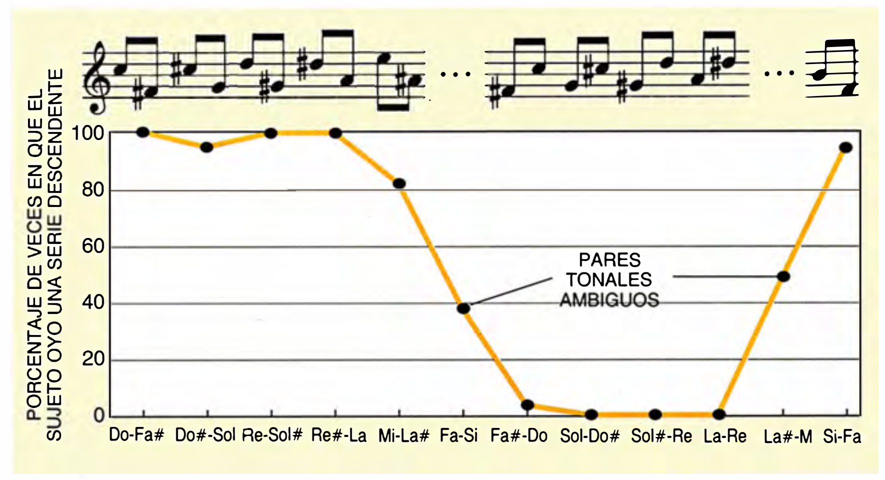
Cuando examiné esta cuestión, se me ocurrió que el sistema perceptual podría disponer de otros indicios. El oyente podría establecer la posición absoluta correspondiente a los sonidos del círculo de clases tonales. Podríamos imaginar, por ejemplo, que las clases tonales son los números de la esfera de un reloj, y que los sujetos pudieran orientar ésta de manera que el Do ocupase la posición de las doce, el Do# se encontrase en la una, y así sucesivamente. Entonces el grupo Do-Fa# sería percibido como par descendente (y otro tanto los pares Si-Fa y Do#-Sol), mientras que Fa#-Do (amén de Fa-Si y de Sol-Do#) lo serían como pares ascendentes.

Para someter la hipótesis a comprobación, les presenté a los sujetos experimentales estos mismos pares, generados mediante un programa de ordenador creado por F. Richard Moore. Cada sonido constaba de seis componentes sinusoidales, todas de la misma clase tonal. Los sujetos determinaban si los tonos formaban serie ascendente o descendente. Sus impresiones fueron representadas gráficamente en función de la clase tonal del primer término del par; por consiguiente, el par Do-Fa# sería asignado a la clase tonal Do. Los resultados confirmaron la hipótesis de forma impresionante. Los juicios de casi todos los sujetos mostraban relaciones ordenadas con respecto a la clase tonal del primer sonido: los tonos de una región del círculo eran percibidos como de altura superior a los de la región opuesta.

Apareció, además, algo inesperado. En lo tocante a altura sonora, la orientación del círculo de clases tonales variaba radicalmente de unos sujetos a otros. Para algunos, el par tonal Re-Sol#, sea por caso, era percibido como descendente, lo que indicaba que situaban a Re en la región superior del círculo tonal (la que iría desde las 9 hasta las 3) y a Sol# en la mitad inferior. Otros sujetos, sin embargo, percibían una pauta ascendente; orientaban, pues, a Re en la mitad inferior y a Sol# en la superior. Los sujetos detectaban una inversión de esta ilusión al transponer la serie a lo largo de la escala de semitonos.

Tales hallazgos ponen de manifiesto que el círculo de clases tonales



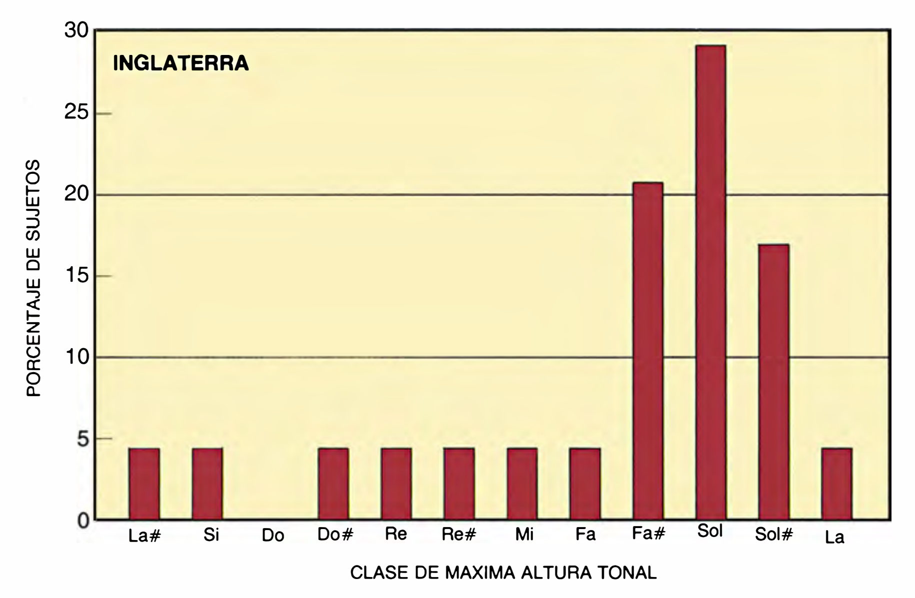


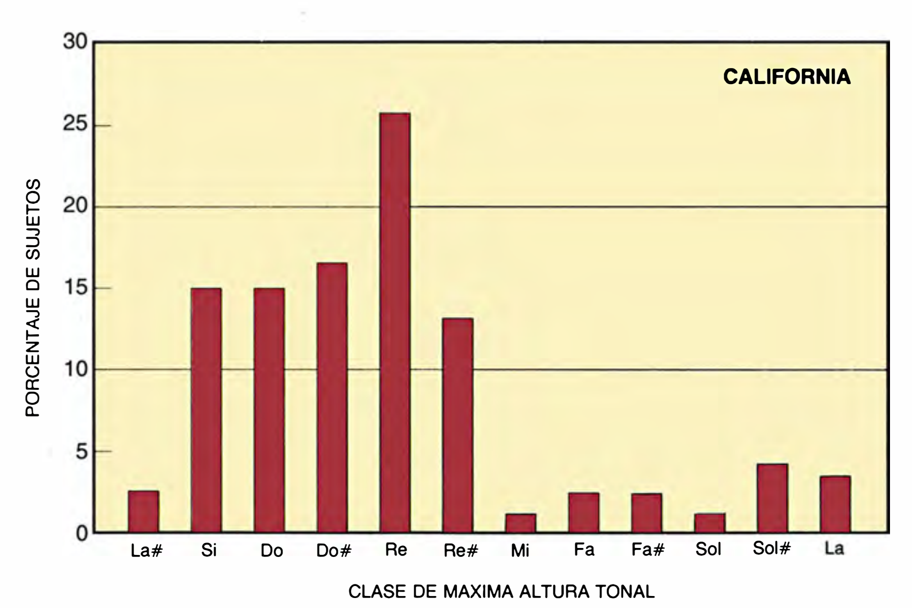
3. LA PERCEPCION de la paradoja tritonal difiere de un sujeto a otro. El primero (*arriba*) percibió claramente ascendentes las series Do#-Sol, Re-Sol#, Re#-La y Mi-La#, mientras que las series Fa#-Do, Sol-Do#, Sol#-Re, La-Re#, La#-Mi y Si-Fa eran para él descendentes. El segundo (*abajo*) oyó prácticamente lo contrario: los pares considerados ascendentes por el primer sujeto eran percibidos como descendentes y viceversa. Ambos encontraron que ciertos pares eran ambiguos: los pares tonales eran considerados ascendentes y descendentes con parecida frecuencia.

no es llano en lo tocante a altura sonora. Por el contrario, cuando los oyentes deciden si los pares de tonos relacionados por media escala forman serie ascendente o descendente, sus estimaciones guardan una relación sistemática con las posiciones de los tonos a lo largo del círculo de clases tonales. Se da, por contra, una llamativa discrepancia acerca de cuál es la región del círculo constituida por tonos altos y cuál por tonos bajos. Tales hallazgos, tomados en conjunción, constituyen la paradoja tritonal.

Juntamente con William L. Kuyper y Yuval Fisher he realizado un estudio a gran escala de la paradoja tritonal. Seleccionamos un grupo de estudiantes de primer ciclo, todos ellos con audición normal y capaces de discernir fiablemente si los pares tonales formaban serie ascendente o descendente. Descubrimos que las posiciones de los sonidos en el círculo de clases tonales influían poderosamente en los juicios individuales. La dirección de esta tendencia variaba de unos individuos a otros, como era de esperar. Además, las simulaciones computarizadas indicaban que tales percepciones existen en grado significativo en la población general.

Llevé a cabo otros estudios encaminados a averiguar si se daba el mismo fenómeno al utilizar series sonoras más complejas. Creé la paradoja semitonal. El motivo sonoro consistía en dos pares de tonos presentados simultáneamente; uno de los pares ascendía un semitono, el otro descendía ese mismo intervalo. Los pares tonales hallábanse diametralmente opuestos en el círculo de clases tonales, por lo que, como antes, no era posible invocar la proximidad para formular juicios de altura relativa. Los oyentes, por lo común, percibían esta pauta como dos secuencias de un paso que se movían en sentidos opuestos. Algunos suje-





4. PERCEPCION OPUESTA de la paradoja tritonal por parte de la población inglesa y californiana. Cada gráfica muestra la proporción de sujetos que percibieron que un tono residía en la región más alta del círculo de clases tonales (es decir, en la posición de las 12). En general, cuando uno de los grupos oía descender un motivo, el otro lo oía ascender. Queda por ver si tales diferencias tienen consecuencias para la apreciación o la ejecución de música.

tos, empero, percibían ascendente la línea de tonos superiores y la de tonos inferiores, descendente. Otros percibían la pauta contraria.

Lo mismo que en la paradoja tritonal, los juicios en la semitonal reflejaron una relación ordenada entre las percepciones de altura de los tonos y sus posiciones en el círculo de clases tonales. Además, la forma de esta relación variaba de unos individuos a otros. Un sujeto, por ejemplo, juzgaba que los tonos Fa, Fa#, Sol, Sol#, La y La# eran más altos que los Do, Do#, Re y Re#; sin embargo, a un segundo sujeto los tonos Do#, Re, y Re# le parecían más altos que los Fa, Fa#, Sol, Sol#, La, La# y Si.

En colaboración con Moore y Mark B. Dolson generé también un tipo de paradoja más compleja, presentando a nuestros sujetos tres pares simultáneos de tonos. Hacíamos sonar los tonos Re y Si, seguidos de Mi y La y después de Fa y Sol. Los oyentes, por lo general, percibían en esta serie dos melodías simultáneas, una más alta y otra más baja, que se movían en direcciones contrarias. Ciertos oyentes juzgaron que la melodía más alta era descendente y que la de tono más bajo era ascendente; otros juzgaron lo contrario. Cuando transpusimos la secuencia media octava, los sujetos informaron de que las melodías alta y baja parecían haber intercambiado sus posiciones. Esta paradoja melódica muestra que los sujetos estaban preservando perceptualmente las alturas relativas de las diferentes clases tonales.

Presenté posteriormente la paradoja melódica bajo seis claves diferentes: Do, Re, Mi, Fa#, Sol# y La#. Corresponden estas claves a seis peldaños iguales sobre el círculo de clases tonales. Las percepciones de los sujetos sobre si las melodías eran ascendentes o descendentes dependían de la clave en que se tocasen las notas. En otra demostración fui tocando repetidamente la secuencia subiendo de clave un tono completo cada vez, con lo que la serie estuvo inicialmente en clave de Do, después, de Re, y así sucesivamente. La primera vez, casi todo el mundo oyó la serie de una forma; al ir desplazándose la clave, la pauta se volvió de arriba abajo, por así decirlo, y finalmente volvió a enderezarse por sí. Con otras palabras, la serie parecía girar de manera análoga a la rotación de las figuras en la visión.

Todas estas paradojas conducen a conclusiones fascinantes acerca del sistema de percepción auditiva. Obviamente, resulta posible infringir el principio de equivalencia bajo transposición, principio que se había creído de validez universal. Los cambios de clave afectan inequívocamente a la percepción de ciertas secuencias de notas. Otra conclusión sorprendente concierne al fenómeno del tono absoluto, que es la facultad de decir qué nota es la tocada con sólo oírla. Los músicos valoran en alto grado esta capacidad, presuntamente rara. Los experimentos indican, empero, que su frecuencia es mucho mayor: los individuos pueden percibir las notas como más altas o más bajas basándose en la clase tonal.

Los hallazgos respaldan la investigación realizada a principios del decenio pasado por Ernst Terhardt y Manfred Seewann, de la Universidad Técnica de Munich, y W. Dixon Ward, de la Universidad de Minnesota, quienes descubrieron que los músicos eran capaces por lo general de determinar si pasajes bien conocidos se estaban tocando en la clave correcta, a pesar de que la mayoría de ellos no poseían el sentido de tono absoluto cual es convencionalmente definido. Más todavía, muchos de ellos consiguieron incluso discriminar la clave aun siendo la discrepancia de un solo semitono.

Finalmente, las paradojas podrían tener consecuencias para la audición habitual de música. He descubierto que diferentes tipos de complejos tonales —análogos a los grupos de tonos producidos por instrumentos naturales tocando en relación de octava— dan pie a las mismas paradojas que los tonos más simples estudiados aquí. Además, los efectos perduraban cuando los tonos fueron sometidos a distintas manipulaciones que afectan a la duración, como fluctuaciones rápidas de altura (vibrato), cambios súbitos de volumen sonoro o amortiguaciones rápidas.

En vista de la gran variedad de sonidos capaces de producir estas paradojas, es verosímil que se den también en la música interpretada con instrumentos naturales, lo que podría suscitar sutiles diferencias perceptuales que pudieran tener importancia estética en algunas piezas, sobre todo en obras orquestales donde el compositor ha buscado deliberadamente la impresión de ambigüedad. Tales ambigüedades se presentan, por ejemplo, en los *Nocturnos* de Debussy.

¿Cuál puede ser la base de esta inesperada relación entre clase tonal y altura sonora, así como de las diferencias individuales en la percepción de estas paradojas? Los experimentos llevados a cabo con la población general, en los que no se halló correlación con la preparación musical de los sujetos, indican que las paradojas no son de origen musical. Otros estudios me han permitido descartar características sencillas del mecanismo de audición. He realizado, por ejemplo, experimentos en los que se le presentaban a uno de los oídos solamente los componentes impares de cada tono y al otro, únicamente los pares. La paradoja tritonal persistió, lo que indica que el cerebro produce la paradoja integrando información procedente de ambos oídos.

Basándome en las conclusiones anteriores y en diversas observaciones informales, llegué a conjeturar que la responsabilidad de tales resultados podría ser atribuible a las estructuras del habla. Me había fijado ya en que los oriundos del sur de Inglaterra percibían la paradoja tritonal de forma distinta de los californianos: lo que para un grupo eran sonidos ascendentes para el otro era una serie en descenso.

¿A qué podríamos atribuir esta discrepancia? Supuse que las personas podrían con el tiempo haberse formado una representación de la gama tonal de sus voces al hablar. En tal representación podría figurar una preferencia por una banda de una octava de amplitud que contiene la máxima proporción de valores tonales de su habla. Yendo más lejos, presumí que el oyente fija las clases tonales definiendo esta banda de una octava en las posiciones más altas del círculo de clases tonales (esto es, en la vecindad horaria de las doce). Tal definición determina la forma en que el individuo oye las paradojas.

Con el fin de examinar esta hipótesis emprendí un estudio juntamente con Tom North y Lee Ray. Seleccionamos sujetos cuyos juicios de la paradoja tritonal mostrasen relaciones claras entre clase tonal y altura percibida. Seguidamente registramos 15 minutos de habla espontánea de cada uno de los sujetos. A partir de esta grabación determinamos la banda de amplitud una octava que contenía máximo número de valores tonales en el habla del sujeto.

Al cotejar los resultados correspondientes a cada sujeto, hallamos una correlación significativa entre las clases tonales definidoras de esta banda para el caso del habla con las tonalidades que determinan la posición más alta en el círculo de clases tonales, posición establecida a partir de los juicios de cada individuo al respecto de la paradoja tritonal. Los hallazgos de este experimento dan cuerpo a la hipótesis de que la percepción de la paradoja tritonal está basada en la representación de círculo de clases tonales que se forma el oyente, vale decir, en una especie de plantilla perceptual. La orientación de tal plantilla está relacionada con la gama tonal de la propia voz al hablar.

¿Cómo llegan a surgir estas preferencias? A tenor de una interpretación, la gama vocal del oyente es completamente innata. Más todavía, ciertas ilusiones auditivas parecen ser resultado de diferencias neurológicas básicas. Las investigaciones han mostrado, por ejemplo, que la percepción de ciertas ilusiones guarda relación con la quiralidad (la destreza o zurdería) del oyente. Otra posibilidad es que la plantilla oral fuese adquirida progresivamente, a través del contacto con el habla de otros. Los individuos se valdrían de tal plantilla para ajustar a ella su propia expresión hablada y para evaluar el habla ajena.

Sería de esperar, en consecuencia, que las características de tal plantilla no fuesen idénticas para quienes hablan en diferentes lenguas o dialectos, de igual forma que varían otras peculiaridades del habla, como la calidad de las vocales. De seguir esta línea argumental, la orientación del círculo de clases tonales debería ser similar en lo tocante a las alturas de las tonalidades cuando los individuos hablan el mismo idioma o dialecto, y debería variar, en cambio, en el caso de hablantes de lenguas o dialectos diferentes.

El estudio realizado por Kuyper, Fisher y la autora proporcionó las pruebas iniciales favorables a la tesis de adquisición progresiva de plantillas para el habla. Se apreció en los sujetos una distribución frecuencial ordenada, con valores máximos para las tonalidades Do# y Re, seguidas de Do y Re#.

En vista de este resultado preliminar, llevé a cabo un estudio más detallado. Con tal propósito seleccioné dos grupos. Constaba el primero de 24 individuos que se habían criado en California y hablaban con el acento regional. El segundo estaba formado por 12 personas del sur de Inglaterra. Hallé en el experimento que en el grupo inglés las clases tonales de máxima frecuencia eran Fa#, Sol y Sol#; en cambio, en el grupo californiano éstas eran las correspondientes a Si, Do, Do# y Re. La educación musical de los sujetos no parecía tener influencia, ni tampoco la edad o el sexo. Este experimento proporciona vigoroso respaldo a la tesis de que el individuo, a través de un proceso de aprendizaje, se forma una representación del círculo de clases tonales provista, en lo que a la altura tonal se refiere, de una determinada orientación.

Parece razonable suponer que nos valemos de dicha plantilla tanto al hablar como al interpretar el habla ajena. De esta forma, los hablantes, sean femeninos o masculinos, pueden apelar a una plantilla basada en la clase tonal y no en la mera altura tonal, salvando así las diferencias de altura de sus tonos de voz.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AUDITORY PATTERN RECOGNITION. Diana Deutsch en *Handbook of Perception and Human Performance*. Edición de Kenneth R. Boff, Lloyd Kaufman y James P. Thomas. Wiley Interscience, 1986.

THE TRITONE PARADOX: AN INFLUENCE OF LANGUAGE ON MUSIC PERCEPTION. Diana Deutsch en *Music Perception*, vol. 8, n.º 4, págs. 335-347; verano de 1991.

SOME NEW PITCH PARADOXES AND THEIR IMPLICATIONS. Diana Deutsch en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Serie B, vol. 336, n.º 1278, págs. 391-397; junio de 1992.

Protección de la intimidad en la era electrónica

Una invención criptográfica conocida por firma opaca permite utilizar números como moneda electrónica o suplir los documentos de identificación. El individuo retoma así el control de la información personal que le concierne

David Chaum

Cada vez que telefoneamos, pagamos compras mediante tarjeta de crédito, nos suscribimos a una revista o liquidamos los impuestos, la correspondiente información va a parar a una base de datos, ubicada no sabemos dónde. Además, todos esos registros pueden ser concatenados y constituir así un único "dossier", un expediente, que no sólo contiene nuestro historial médico o financiero, sino lo que compramos, a dónde viajamos y con quiénes nos comunicamos. Resulta prácticamente imposible conocer el contenido pleno de las fichas que sobre nosotros han abierto diversas organizaciones, y mucho más difícil aún estar seguros de su exactitud o poder controlar de alguna forma quiénes tienen acceso a ellas.

Los organismos públicos y las organizaciones privadas acumulan y concatenan registros para su propia protección. No hay duda de que a una entidad financiera le sería útil saber que un tal Juan Español, peticionario de un crédito, ha dejado impagados cuatro préstamos similares en los dos últimos años. La posesión de tal información no sólo le conviene al banco sino también a los otros clientes, en quienes el banco descarga los costos de los fallidos. Por otra parte, tales registros permiten que Inés Castro, cuya puntualidad en los pagos es impecable, abra una cuenta de cargo en una tienda donde no es conocida de nada.

DAVID CHAUM encabeza el grupo de criptografía del Centro de Matemáticas e Informática (CWI), donde ingresó en 1984, a los dos años de doctorarse en informática por la Universidad de California en Berkeley. Es también fundador de DigiCash, compañía que desarrolla sistemas de pago electrónico.

Sin embargo, esa misma información, en malas manos, no proporciona ni protección al comercio ni mejor servicio a los consumidores. Los ladrones se valen sistemáticamente de tarjetas de crédito robadas para expoliar a sus titulares legítimos, beneficiándose del buen historial de éstos; incluso se ha dado el caso de asesinos que han localizado a sus víctimas consultando registros de direcciones mantenidos y actualizados por organizaciones estatales. A otro nivel, la Agencia estadounidense de Administración Tributaria ha tratado de espigar para inspección fiscal a ciertos contribuyentes basándose en estimaciones de la renta familiar preparadas por las compañías de "mailing" (que compilan listas para venta por correo).

La creciente cantidad de información que las diferentes organizaciones van recopilando acerca de una persona pueden ser concatenadas y cotejadas porque, para identificar a los individuos, todas se valen de una misma clave, como puede ser el número de carné de identidad o el de identificación fiscal. Este sistema, basado en un identificador, entraña necesariamente una componenda en la que la seguridad se adquiere con sacrificio de libertades individuales. Cuanto mayor es la información de que disponen las organizaciones (sea para protegerse de fraudes, o simplemente para orientar mejor sus campañas de ventas), tanto menor es la capacidad de los individuos para controlarla y defender lo perteneciente a su intimidad y les es privativo, es decir, su privanza.

A lo largo de los ocho últimos años, el autor y sus colegas del CWI (Centro de Matemáticas e Informática de Amsterdam, sostenido por el estado holandés) han desarrollado un nuevo sistema, inspirado en progresos fundamentales de índole teórica y práctica conseguidos en criptografía, el cual hace innecesaria la transacción entre seguridad y privanza antedicha. Las operaciones efectuadas mediante nuestras técnicas impiden la posibilidad de fraude al tiempo que protegen y respetan la intimidad de quienes las efectúan.

En nuestro sistema, los usuarios facilitarían un pseudónimo distinto (pero inequívocamente verificable) a cada organización con la que interactuasen, haciendo así imposible la confección de un expediente personal. Podrían pagar los bienes o servicios con efectivo electrónico imposible de rastrear, o presentar credenciales digitales que cumplirían la función de un número de identificación bancario, de un NIF o de una tarjeta electoral, sin revelar la identidad del titular. Al propio tiempo, las organizaciones se beneficiarían de una seguridad mayor y de costos inferiores en el mantenimiento de sus archivos.

Las innovaciones recientes en microelectrónica hacen viable la idea explicada, al facilitar "representantes" personales que almacenan y gestionan los pseudónimos, las credenciales y el numerario de sus titulares. Los microprocesadores capaces de ejecutar los algoritmos necesarios han sido ya alojados en ordenadores de bolsillo del tamaño y grosor de una tarjeta de crédito. Los sistemas, ensayados a pequeña escala, podrían alcanzar amplia difusión a mediados del decenio en curso.

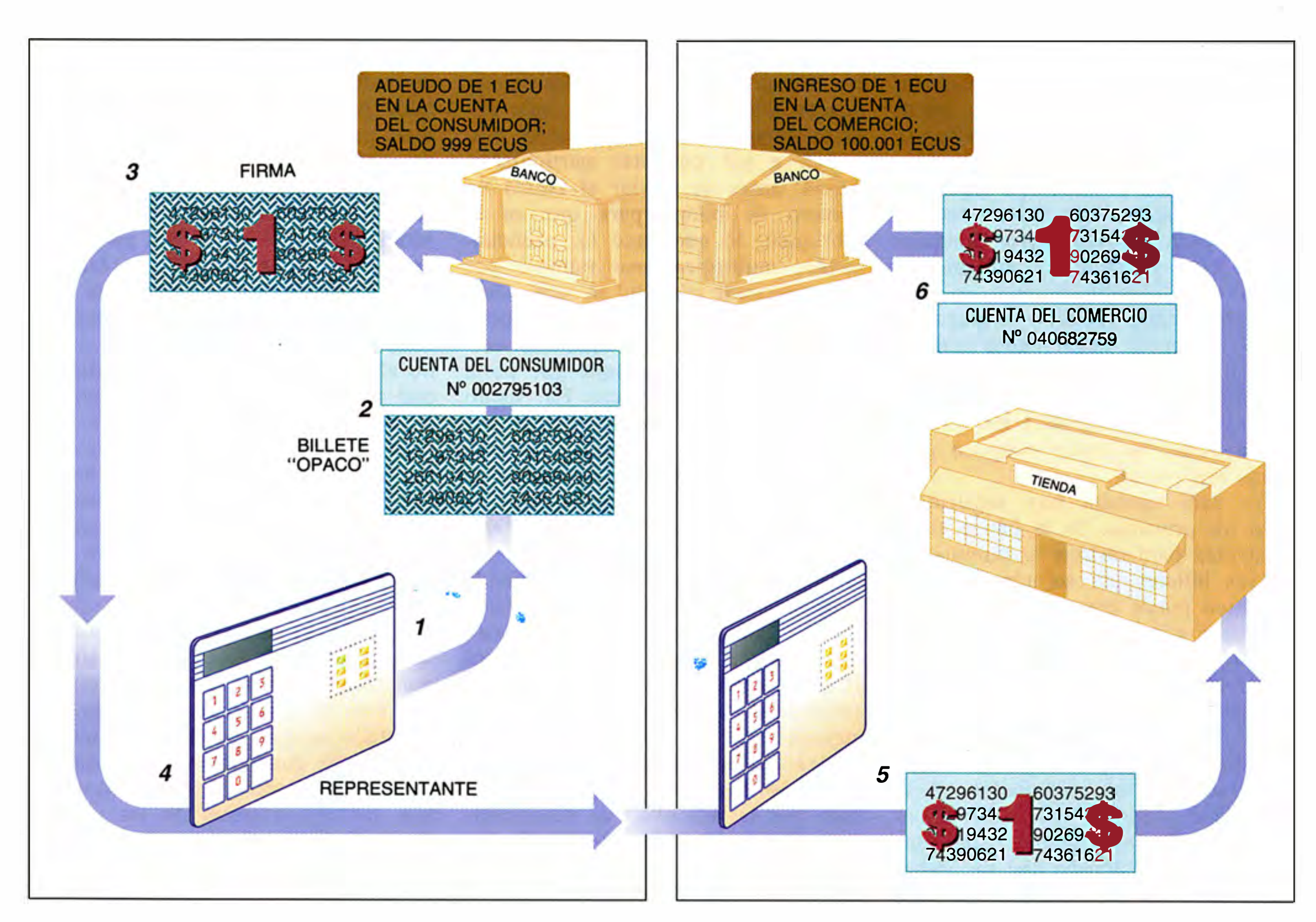
El punto de partida de todo este método es la noción de firma o signatura digital, propuesta en 1976 por Whitfield Diffie, entonces en la Universidad de Stanford. Una firma digital transforma el mensaje firmado de suerte tal que quienquiera lo lea tenga certeza plena de quién es el remitente. Estas rúbricas se valen de

una clave secreta utilizada para firmar mensajes y de una clave pública utilizada para verificarlos. Unicamente pueden ser verificados mediante la clave pública aquellos mensajes que vayan firmados con la clave particular. Así, por ejemplo, si Alicia desea enviar un mensaje a Benito (dos personajes hipóteticos favoritos de la comunidad criptográfica), ella comienza transformándolo mediante su clave particular y él aplica la clave pública de Alicia para asegurarse de que ha sido ella la remitente del mensaje. Incluso supuesta conocida la clave pública, los mejores métodos disponibles para generar firmas falsificadas exigirían muchos años, aun cuando se empleasen ordenadores billones de veces más rápidos que los actuales.

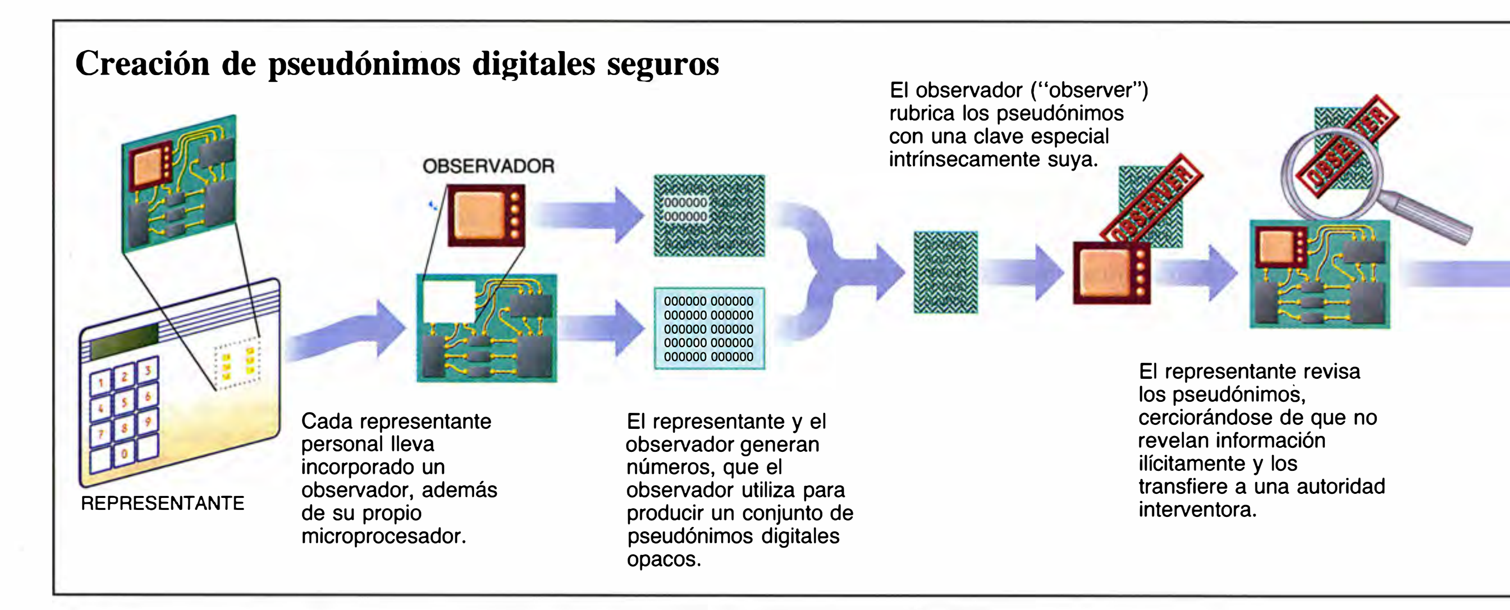
Para comprender la forma en que las signaturas digitales pueden facilitar toda clase de credenciales infalsificables y servicios similares, examinaremos de qué modo podrían proporcionar un sustituto electrónico del papel moneda. Nuestro banco digital, el Digibank, ofrecería billetes electrónicos: mensajes firmados mediante una clave particular. Todos los mensajes portadores de cierta clave podrían tener el valor de 1 ecu; todos los portadores de una segunda, 5 ecus, y así para todas las denominaciones necesarias. La autenticidad de estos billetes bancarios electrónicos podría verificarse utilizando la correspondiente clave pública, que el banco facilita a sus clientes. El Digibank haría también pública una clave certificadora de los documentos enviados electrónicamente por la entidad a sus clientes.

Para retirar un ecu del banco, Alicia genera un número de billete (cada billete porta un número diferente, algo así como el número de serie de los números de los billetes actuales) y elige al azar un número de 100 cifras, pongamos por caso, para que la probabilidad de que otra persona utilice el mismo sea despreciable. Rubrica después el número elegido con la clave reservada correspondiente a su "pseudónimo digital" (la clave pública que Alicia ha establecido previamente para el uso de su cuenta). El banco verifica la firma de Alicia y la retira del número de billete; por su parte, estampa en el número de billete su firma acreditativa de un ecu. Devuelve enseguida el billete juntamente con un comprobante digitalmente firmado de reintegro de efectivo, que entrega a Alicia para la contabilidad de ésta. En la práctica, las operaciones de creación, firma y transferencia de números de billetes serían efectuadas por el microprocesador de la tarjeta de Alicia. No obstante, la potencia de los protocolos criptográficos reside precisamente en que su seguridad es independiente del medio físico: las mismas transacciones podrían haberse realizado en principio sólo con lápiz y papel.

Alicia, para abonar una compra en el establecimiento de Benito, conecta su tarjeta "inteligente" al lector de Benito y transfiere uno de los billetes firmados que el banco le ha proporcionado. Benito, tras verificar el sello del banco, transmite el billete a la entidad bancaria por un procedimiento



1. EL DINERO DIGITAL fluye sin dejar rastro desde el banco a través del consumidor y el comerciante hasta retornar al banco. Valiéndose de un "representante", el usuario crea un número que servirá de billete bancario. El banco pasa el cargo a la cuenta apropiada y firma el billete con una signatura digital infalsificable que indica su valor. El banco, al serle presentado el billete por el comerciante, acredita su importe en la cuenta de éste. La técnica de firma opaca impide que el banco vea el número del billete, imposibilitando la concatenación de los reintegros de una cuenta con las imposiciones en otra.



muy similar al que hoy siguen los comerciantes en las ventas con tarjeta. El banco comprueba nuevamente que la firma es realmente la suya, confronta el número del billete con una lista de los ya gastados y acredita el importe en la cuenta de Benito. A continuación transmite un resguardo del depósito, igualmente infalsificable, firmado con la clave adecuada. Benito entrega la mercancía junto con su propio recibo digitalmente firmado, cerrando así la transacción.

Este sistema proporciona seguridad a las tres partes. Las firmas necesarias en cada fase impiden a cualquiera de ellas defraudar a ninguno de los otros: el establecimiento no puede negar haber recibido el pago, el banco no puede negar haber emitido los billetes ni que la tienda los ha ingresado en él, y la cliente no puede negar que ha retirado los billetes de su banco ni puede tampoco gastarlos dos veces.

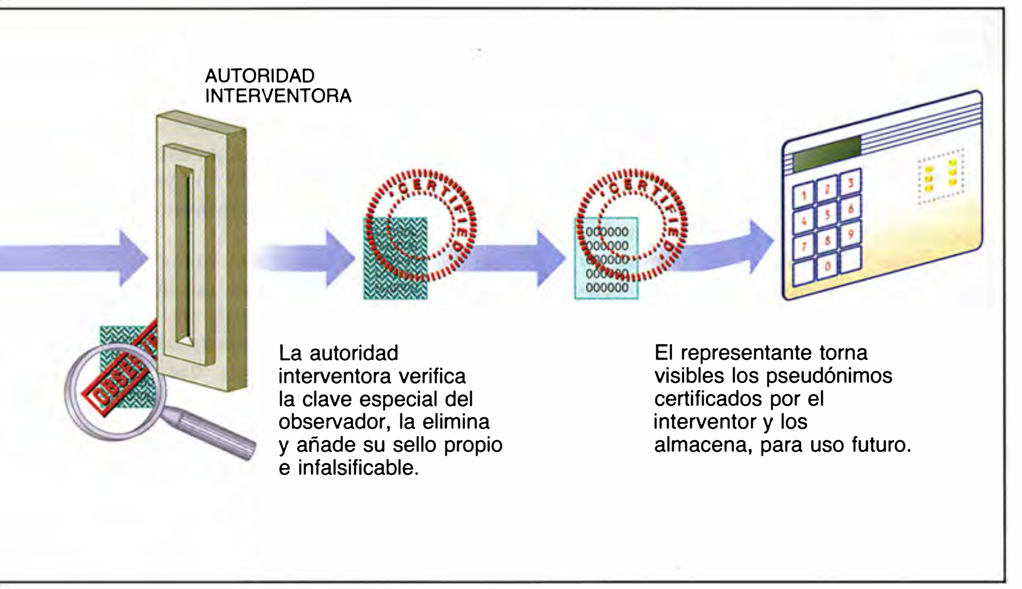
En este sistema hay seguridad, pero no privanza. Si el banco tiene capacidad para rastrear la circulación de sus billetes por su número identificativo puede concatenar los depósitos que efectúa cada comercio con el correspondiente reintegro y determinar así exactamente cuándo y dónde gasta su dinero Alicia (o cualquier otro cliente del banco). El expediente resultante es todavía más intrusivo que los compilados en la actualidad. Además, los registros basados en firmas digitales son más susceptibles de abusos que los ficheros convencionales. No sólo son autocertificantes (si son copiados, la información que contienen puede ser verificada por cualquiera), sino que además consienten a quienes poseen una determinada clase de información demostrar la existencia de la misma sin revelarla ni revelar sus fuentes. Por ejemplo, se podría demostrar incontrovertiblemente que Benito le había telefoneado a Alicia en doce ocasiones distintas sin tener que revelar ni el lugar ni el momento de ninguna de esas llamadas.

He desarrollado cierto aspecto de las firmas digitales, llamadas firmas opacas ("blind signatures"), que podrían devolver el control de su intimidad a las personas particulares. Alicia, antes de enviar al banco un número de billete para que se lo rubriquen, lo que hace es, esencialmente, multiplicar ese número por un coeficiente elegido al azar. Consiguientemente, el banco no puede saber cuál es el billete que está certificando; únicamente sabe que porta la firma digital de Alicia. En cuanto recibe el billete "opaco" sellado por el banco, Alicia divide el número entre el coeficiente de ocultación y utiliza el billete igual que antes.

Los números del billete opaco son "incondicionalmente indetectables", lo que significa que aunque la tienda y el banco se pusieran de acuerdo, no podrían determinar quién gastó cada billete. Como el banco ignora el coeficiente de opacidad, no puede concatenar los billetes que Benito le ingresa con los reintegros que le hace a Alicia. Mientras que la seguridad de las firmas digitales está dada por la dificultad de determinados cómputos, el anonimato de los billetes opacos no tiene más límite que la impredictibilidad de los números tomados al azar por Alicia. No obstante, si lo desea, Alicia puede revelar dichos números y permitir que sus billetes sean detectados o que sea detenida su circulación.

Los billetes bancarios electrónicamente opacados pueden proteger la privacidad de los individuos, pero al ser cada billete un mero número, es fácil de copiar. Para evitar que sea gastado más de una vez, antes de aceptarlo sería preciso confrontarlo instantáneamente —"en línea"— con una lista central. Tal procedimiento de verificación podría resultar aceptable para el manejo de grandes sumas, pero sería con mucho demasiado oneroso para la compra de un periódico, pongamos por caso. Para resolver este problema, Amos Fiat, Moni Naor y el autor han propuesto un método de generación de billetes opacos, que exige al comprador responder a una indagación numérica aleatoria acerca de cada billete cuando efectúa un pago. La indetectabilidad incondicional no sufre menoscabo al gastar el billete una sola vez; pero si se gastara dos veces, revelaría información suficiente para localizar fácilmente la cuenta del consumidor. De hecho, puede incluso generar una confesión con firma digital que ni siquiera el banco puede falsificar.

Existen ya tarjetas "inteligentes" capaces de tales pagos anónimos. Más todavía, DigiCash, compañía con la que estoy asociado, ha instalado equipos en dos edificios de oficinas de Amsterdam que permiten a las copiadoras, las máquinas de fax, las registradoras de las cafeterías e incluso a las expendedoras de café y refrescos aceptar "billetes de banco" digitales. Hemos exhibido también un sistema para el cobro automático del peaje en autopista, en el cual los automóviles van provistos de una tarjeta que responde a mensajes radiados solicitando el pago,



ras no van a ser copiadas y difundidas (aun cuando la copia fuese detectable después).

Las organizaciones han empezado a emitir tarjetas a prueba de manipulaciones (que constituyen, de hecho, representantes suyas) programadas para impedir conductas indeseables. Lo malo es que estas tarjetas podrían ser a modo de diminutos "Gran Hermano" en nuestros bolsillos.

Hemos puesto a punto un sistema que satisface a ambas partes. Un observador —en realidad, un microcircuito a prueba de manipulaciones, producido por alguna entidad en la que las organizaciones puedan confiar— actúa a modo de notario y certifica el comportamiento del representante en el que está incrustado. La empresa Philips Industries ha presentado hace poco un microcircuito de ésos, dotado de potencia de cómputo suficiente para generar y verificar signaturas digitales. Siemens, Thomson CSF y Motorola han anunciado su propósito de construir circuitos parecidos, que podrían actuar de observadores.

La idea esencial que subyace al protocolo para observadores es que el observador no confía en el representante que le alberga, ni el representante se fía tampoco del observador. Más todavía, el representante ha de poder controlar todos los datos que se dirigen hacia el observador o provienen de él; de lo contrario, el microcircuito "intocable" podría filtrar información hacia el mundo exterior.

aun cuando los automóviles circulen a velocidad de crucero.

Mis colegas y yo damos el nombre de "representante" a todo ordenador que esté encargado de la gestión de estas transacciones criptográficas. Una misma persona podría utilizar como representantes varios ordenadores, según su conveniencia: Benito podría adquirir programas (que le serían transmitidos por una red de comunicaciones) valiéndose de su ordenador doméstico para generar las firmas digitales requeridas, podría salir de compras con un ordenador de mano (de los llamados "palm top") o irse a la playa portando consigo una tarjeta de crédito inteligente para pagar refrescos o mariscos. Cualquiera de estas máquinas podría representar a Benito en una transacción en tanto las firmas digitales que cada una de ellas genere estén bajo el control de aquél.

La verdad es que tales ordenadores pueden actuar como representantes de sus propietarios en la inmensa mayoría de transacciones. Benito puede confiar en su representante y Alicia en el suyo porque cada uno de ellos ha elegido su propia máquina y puede reprogramarla a voluntad (e incluso, en última instancia, construirla por sí mismos a partir de sus componentes). Las organizaciones se hallan protegidas por el protocolo criptográfico y no necesitan fiar en representantes.

El representante prototípico es un ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito, que contiene memoria y un microprocesador. La tarjeta dispone también de su propio teclado y de una pantalla, para que el usuario pueda controlar los datos que son almacenados e intercambiados. Si fuese el establecimiento quien proporcionase el teclado y la pantalla, el equipo podría interceptar las contraseñas de camino a la tarjeta o mostrar un precio al cliente y cargar otro distinto. Lo ideal sería que las tarjetas se comunicasen con las terminales de los bancos o comercios mediante enlaces de corto alcance, como los transceptores por infrarrojos, con lo que no tendrían que abandonar nunca las manos de sus propietarios.

Al serle requerido un pago, el representante ofrecería un resumen de los detalles y aguardaría la autorización del titular para entregar fondos. El representante exigiría la entrega de resguardos electrónicos por parte de las organizaciones en cada fase de cada transacción, para sustanciar la situación de su propietario en caso de desacuerdo. El representante, exigiendo una contraseña similar al NIP (número de identificación personal) hoy utilizado en las tarjetas bancarias, podría proteger al propietario de abusos de terceros, por ejemplo, en caso de robo. Es de suponer que casi todo el mundo conservaría copias de seguridad de sus claves, billetes electrónicos y demás datos; podrían, pues, recuperar sus fondos en caso de robo o extravío del representante.

Los representantes personales ofrecen excelente protección de la intimidad individual, pero las organizaciones preferirían sin duda mecanismos que salvaguardasen sus intereses con el máximo celo posible. Los bancos buscarían impedir totalmente la duplicidad de gasto de los billetes a la mera detección del hecho. No pocas organizaciones querrán además asegurarse de que determinadas signatu-

Cuando Alicia adquiere un observador, lo instala en su representante —su tarjeta inteligente, sea por caso— y lo lleva a una autoridad interventora para conferirle validez. El observador genera un lote de pares de claves públicas y privadas a partir de una combinación de sus propios números aleatorios y de números suministrados por la tarjeta. El observador no revela sus números, pero sí facilita suficiente información sobre ellos, de suerte que la tarjeta pueda verificar posteriormente si sus propios números han sido utilizados para producir las claves resultantes. La tarjeta produce también datos aleatorios que servirán para cegar cada una de las claves.

Seguidamente, el observador torna opacas las claves públicas, las firma con una clave especial que lleva incorporada y se las suministra a la tarjeta. La tarjeta verifica la opacidad y la firma; verifica esas claves para cerciorarse de que se han generado correctamente. Transfiere entonces las claves cegadas y firmadas a

la autoridad interventora, la cual reconoce la signatura intrínseca del observador, signatura que retira y sustituye por la suya propia. La autoridad devuelve las claves a la tarjeta, que, por así decirlo, las torna visibles. Estas claves, firmadas por la autoridad interventora, harán el papel de pseudónimos digitales para las transacciones futuras; Alicia puede recurrir a ellas conforme se vayan necesitando.

Un observador no tendría dificultad en impedir (y no meramente detectar) la duplicación de gasto de los billetes bancarios electrónicos. Cuando Alicia retira efectivo de su banco, el observador es testigo del proceso y sabe, por consiguiente, qué billetes ha recibido ella. En la tienda de Benito, cuando Alicia le transfiere un billete tomado del banco, le proporciona también un pseudónimo digital (que sólo necesita usar una vez) firmado por el interventor. El observador, entonces, valiéndose de la clave secreta correspondiente al pseudónimo intervenido, firma una declaración certificando que el billete será gastado una sola vez, en la tienda de Benito, y en este día y hora concretos. La tarjeta de Alicia verifica la declaración firmada para cerciorarse de que el observador no deja escapar información y se la transfiere a Benito. El observador está programado para firmar sólo una de tales declaraciones por cada billete dado.

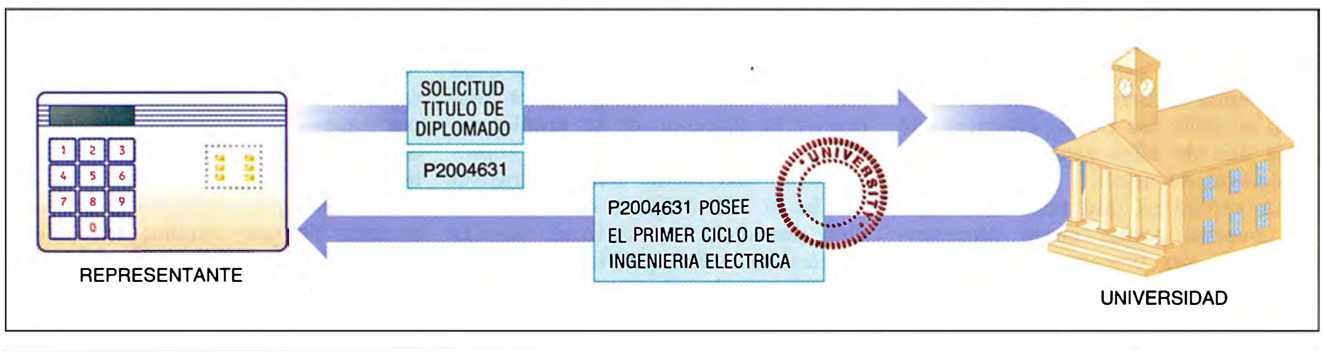
Muchas transacciones no se limitan a la transferencia de dinero, sino que requieren la aportación de credenciales, esto es, información sobre la relación de un individuo con ciertas organizaciones o colectivos. En el mundo de hoy, basado en documentos identificadores, resulta fácil concatenar todas las credenciales de un mismo individuo. Si, pongamos por caso, Alicia está tratando de venderle un seguro a Benito, ella podría servirse del nombre y fecha de nacimiento de Benito para acceder a su historial médico, sus infracciones de tráfico, su situación financiera, o su ficha penal si la hubiere.

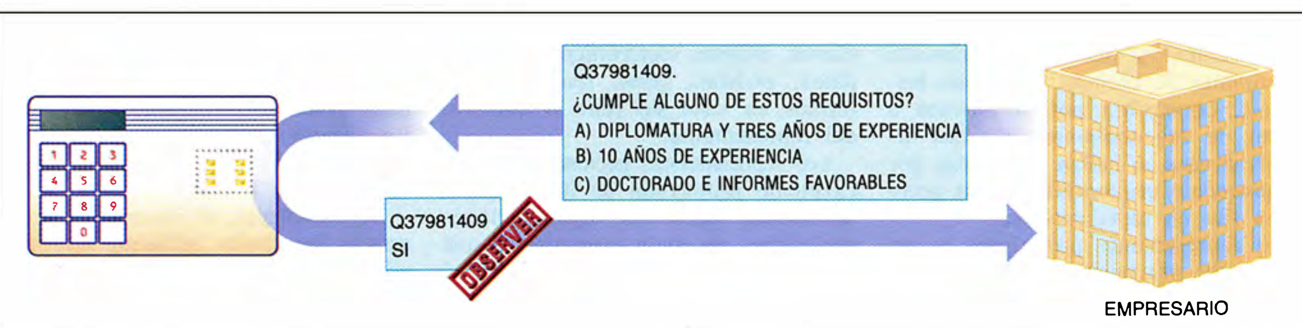
Sin embargo, valiéndose de un representante, Benito establecería relaciones con distintas organizaciones actuando bajo pseudónimos digitales distintos. Cada uno de ellos le reconoce e identifica inequívocamente, pero sus diferentes registros no pueden ser concatenados.

Para ser útil, una credencial digital ha de cumplir la misma función que las credenciales en papel o plástico, como el DNI o un título profesional: tiene que convencer a otros de que la persona que la ostenta se halla en determinada relación con la autoridad que expide el título o la credencial. Los datos que figuran en el DNI —nombre, fotografía, número, etc,— son hoy meros elementos de enlace para conectar a la persona con el correspondiente registro de una base de datos. Exactamente igual que un banco puede emitir numerario electrónico infalsificable e imposible de rastrear, también una universidad podría expedir diplomas con certificación digital; o, una empresa de auditoría, informes de la capacidad de un particular para reintegrar un préstamo.

Cuando el joven Benito se licencia con matrícula de honor en literatura medieval, el secretario de la facultad proporciona al representante de Benito una certificación digital sellada de su título y su historial académico. Después, cuando Benito solicita cursar estudios de doctorado, no le presenta a la comisión de selección todo el historial; su representante le pide a su observador que declare y firme que tiene aprobada la licenciatura y con qué calificación, así como que cumple los requisitos para solicitar una beca o bolsa de estudios, de acuerdo con al menos uno de los criterios de la universidad solicitada (pero sin revelar cuáles). El observador, que ha verificado y almacenado cada una de las credenciales de Benito conforme éste las iba recibiendo, no tiene más que revisar su memoria y suscribir la declaración si ésta es verdadera.

Además de responder exactamente a las preguntas pertinentes y nada más, las credenciales digitales les resultarían a los particulares más sencillas de tramitar y mostrar, mientras





2. LAS CREDENCIALES DIGITALES ponen la información personal bajo el control del representante y el observador del individuo. Cuando Alicia (uno de los dos hipotéticos personajes del autor) termina sus estudios de primer ciclo, la universidad le concede un título sellado digitalmente. Más adelante, el observador de Alicia puede utilizar lo que sabe del título para responder a preguntas concernientes a la capacitación de Alicia sin revelar más información que la estrictamente necesaria.

que a las organizaciones, por su parte, les resultarían de expedición y certificación más sencillas. Los individuos ya no tendrían que cubrir extensos formularios que le solicitan datos y más datos; por el contrario, sus representantes podrían convencer a las organizaciones de que sus titulares cumplen determinados requisitos, sin revelar más que la pertinente cualificación. Dado que estas credenciales no revelan información innecesaria, los individuos estarían dispuestos a utilizarlas incluso en contextos donde preferirían no identificarse, reforzando así la seguridad y proporcionando a la organización más datos útiles de los que de otra forma podría conseguir.

Pero los individuos no sólo poseen credenciales positivas; pueden también adquirir credenciales negativas, que preferirían ocultar: condenas judiciales, incapacitaciones para el ejercicio profesional, retiradas del permiso de conducir, declaraciones de quiebra o suspensión de pagos. En muchos casos, los individuos concederían a las organizaciones el derecho a infligirles credenciales negativas a cambio de ciertos servicios. Por ejemplo, cuando Alicia toma en préstamo libros de una biblioteca, su observador sería instruido para que registrase un apercibimiento por demora de no haber recibido una contraseña de devolución dentro del plazo especificado.



3. TARJETA DE CREDITO desarrollada por Toshiba y Visa International. Contiene un microprocesador y memoria y dispone de teclado y pantalla. Aunque esta tarjeta identifica a su usuario durante las transacciones, podría ser reprogramada como representante personal para gasto de dinero digital.

En cuanto el observador ha registrado una credencial negativa, una organización podría saber que así ha sido solicitando al observador (por intermedio del representante) que firme un mensaje atestiguando su existencia o inexistencia. Aunque el representante podría silenciar al observador, no podría falsificar una declaración acerca del estado de sus credenciales. En otros casos, las organizaciones podrían limitarse a tomar la carencia de acreditación positiva como acreditación negativa. Si Benito se inscribe en un curso de caída libre, sus instructores podrían suponerle físicamente inhábil mientras no dispusieran de la certificación médica correspondiente.

En la mayoría de las credenciales, la signatura digital de un observador es suficiente para convencer a todos de su autenticidad. No obstante, en ciertas circunstancias, la organización podría insistir en que el observador demuestre su presencia física; en caso contrario, un número cualquiera de personas podrían tener acceso a credenciales intransferibles (caso, por ejemplo, de los abonados a un gimnasio) valiéndose de representantes conectados mediante enlaces de comunicaciones secretos a otro representante que contenga la credencial deseada.

Además, el observador ha de poder persuadir al elemento de control de acceso al tiempo que sus dispositivos de entrada y salida de datos se hallan bajo el control del representante que lo contiene. Cuando Alicia llega a su gimnasio, el lector de tarjetas de la entrada sondea a su observador con una serie de preguntas de un solo bit. El observador responde inmediatamente a cada sondeo con un bit aleatorio que es codificado por la tarjeta durante el camino de respuesta a la organización. Es la velocidad de respuesta del observador lo que establece que se encuentra en el interior de la tarjeta (pues el retardo en el procesamiento de un solo bit es despreciable frente al tiempo que tarda una señal en propagarse por un hilo). Al cabo de algunas docenas de iteraciones, la tarjeta le revela al observador la forma en que fue codificando las respuestas; el observador firma una declaración en la que figuran las preguntas y respuestas codificadas solamente en el caso de que haya intervenido en la secuencia de preguntas y respuestas. Este proceso convence a la organización de la presencia del observador sin permitir que éste difunda información.

Las organizaciones pueden asimismo expedir credenciales por métodos exclusivamente criptográficos, sin intervención de observadores. Aunque los métodos prácticos utilizados hoy son sólo capaces de tratar indagaciones relativamente sencillas, Gilles Brassard, de la Universidad de Montreal, Claude Crépeau, de la Ecole Normale Supérieure, y el autor han puesto de manifiesto la forma de responder a combinaciones de preguntas relativas incluso a las credenciales más complejas, sin merma de inconcatenabilidad. La ocultación de credenciales negativas puramente criptográficas podría ser detectada por técnicas de la misma clase que las utilizadas para detectar la duplicación de gasto de billetes electrónicos bancarios. Y una combinación de estos métodos criptográficos con observadores podría ofrecer un descripción de lo acontecido tras el hecho, aun cuando se hubiera deteriorado el microcircuito observador.

La mayor seguridad y respeto de la intimidad que proporcionan las técnicas de certificación digital entrañan un precio: responsabilidad. En este momento, los particulares pueden negar haber efectuado compras con su tarjeta de crédito o recibido reintegros de un cajero automático. Recae sobre el banco la tarea de demostrar que sólo el titular y nadie más pudo haber realizado la compra o cobrado el reintegro. Si los representantes computarizados llegasen a difundirse lo suficiente, serían los usuarios quienes establecieran todas sus contraseñas y controlasen así el acceso a sus representantes. Y no podrían desautorizar las acciones de uno de éstos.

Los sistemas resistentes a manipulación hoy existentes, como los cajeros automáticos y sus tarjetas asociadas, se fundan de ordinario en procedimientos de seguridad débiles e inflexibles, porque han de ser utilizados por personas sin especial preparación ni excesiva preocupación por la seguridad. De ser los individuos quienes proporcionasen sus representantes, podrían programarlos para diversos niveles de seguridad, según conviniera a cada caso. Benito podría valerse de un NIP (número de identificación personal) breve, o incluso prescindir de él para las transacciones de poca monta, y utilizar en cambio una contraseña más larga para las de mayor importancia. Como protección frente a un asaltante que podría arrancarle las claves a punta de pistola se podría utilizar un "código de coacción", que se encargaría de hacer que la tarjeta pareciera operar normalmente al tiempo que oculta las partidas o credenciales más importantes, y fuese quizá capaz también de alertar a las autoridades de que ha sido robada.

Un representante personal podría reconocer a su propietario por métodos que casi todo el mundo consideraría desmesuradamente inquisitivos en sistemas basados en identificadores. Así, un ordenador personal portátil podría ser programado para verificar la voz o las huellas dactilares de su propietario. Por otra parte, la idea de que el lector de barras del supermercado pudiera reconocer la huella del pulgar del cliente y pasar directamente el cargo del carro de la compra a su cuenta de ahorros se nos antoja, en el mejor de los casos, propia del *1984* orwelliano. Contrariamente, una tarjeta de crédito inteligente que reconoce a su propietario por el tacto y va "aflojando" billetes electrónicos es, a la vez, anónima y más segura que el papel moneda. Además, por incorporación de alguna parte esencial de esa técnica de identificación en el observador inmanipulable, la tarjeta resultaría idónea incluso para aplicaciones de muy alta seguridad.

Las transacciones computarizadas de todo tipo son cosa cada vez más corriente. Pasan de media docena los países que han desarrollado o están desarrollando microcircuitos especiales pensando en reemplazar con ello el papel moneda. En Dinamarca, un consorcio de entidades bancarias y compañías de transporte público y comunicaciones ha anunciado una tarjeta que reemplazaría a las monedas y billetes de pequeña denominación; en Francia, las autoridades de telecomunicaciones han propuesto la utilización general de las tarjetas inteligentes hoy usadas para teléfonos de pago. El gobierno singapureño ha solicitado propuestas de sistemas capaces de comunicarse con los automóviles y pasar cargos a sus tarjetas inteligentes al ir pasando por diversos puntos de una carretera (contrariamente a los sistemas de simple identificación de vehículos utilizados hoy en los Estados Unidos y en otros países). Y las compañías de radio y televisión por cable y por satélite están experimentando con tarjetas inteligentes para televisión de pago. Empero, todos estos sistemas se basan en tarjetas que se identifican plenamente en cada transacción.

De proseguir la tendencia hacia las tarjetas inteligentes basadas en identificadores, la intimidad personal se verá cada vez más erosionada. Pero en este conflicto entre seguridad de las organizaciones y libertad individual, ninguno de ambos bandos resulta claro vencedor. Cada tentativa de implantación de técnicas de identificación más perfectas, de análisis de datos o de concatenación generalizada, puede verse frustrada porque la gente, de forma generalizada, no se someta a ellos, y tal vez tropiece con limitaciones legislativas, que pueden a su vez engendrar nuevas tentativas de mayor control.

Por otra parte, en un sistema basado en representantes y observadores, las organizaciones se encuentran en situación de adquirir ventaja competitiva o política gracias a la mayor confianza del público (amén del inferior costo de mantenimiento de los ficheros basados en pseudónimos). Y los individuos, al mantener sus datos personales criptográficamente garantizados y revelar acerca de sí mismos únicamente lo necesario, podrán proteger su privanza sin desatender las necesidades legítimas de aquellos con quienes comercian o se relacionan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE DINING CRYPTOGRAPHERS PROBLEM: UNCONDITIONAL SENDER AND RECIPIENT UNTRACEABILITY. David Chaum en *Journal of Cryptology*, vol. 1, n.º 1, págs. 65-75, 1988.

MODERN CRYPTOLOGY: A TUTORIAL. Gilles Brassard en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 235. Springer-Verlag, 1988.

PRIVACY PROTECTED PAYMENTS: UNCONDITIONAL PAYER AND/OR PAYEE UNTRACEABILITY. David Chaum en *Smart Card 2000: The Future of IC Cards*. Recopilación de David Chaum e Ingrid Schaumüller-Bichl. North-Holland, 1989.

Descubrimiento europeo de la flora americana

Diluida primero en la eclosión de hallazgos europeos y asiáticos, la botánica de las Indias occidentales va asentándose poco a poco hasta adquirir, a finales del XVI, un lugar preeminente

José María Valderas

Cuando Francisco Hernández, protomédico general de las Indias, islas y tierra firme del mar Océano, escribe desde México a Felipe II, en los años setenta del siglo XVI, "que ni habrá necesidad de traer a las Indias medicinas de España ni a España de Alejandría", no estaba empleando una figura retórica. Desde hacía mucho tiempo, Alejandría constituía el mercado de Oriente que abastecía de especias, medicinas y perfumes a Europa. De Alejandría llegaban a Venecia, centro principal de distribución por Italia y el resto del continente.

Pero lo que fue monopolio casi absoluto había sido roto, a principios de siglo, con el descubrimiento portugués de la ruta hacia las Indias orientales. Desde la presencia lusitana en Ceuta, en 1415, el empeño de Enrique el Navegante se caracterizó por la penetración en Africa, continua a lo largo de la costa occidental, que culmina en 1469 al alcanzar la línea del Ecuador. Diogo Câo llega más allá de la desembocadura del Congo y Bartolomeu Días dobla el cabo de Buena Esperanza en 1488. Diez años más tarde, Vasco de Gama, remontando la costa oriental africana, arriba a la India. Entre 1500 y 1512, los portugueses dominan enclaves decisivos de la ruta de la especiería, tras la conquista de las islas Célebes, Molucas y Timor.

Contemporáneamente, entre 1498 y 1502, se desarrolla la guerra turcoveneciana, que supone el descalabro transitorio del comercio mediterráneo y el auge de Lisboa. Habrá, en adelante, cuatro grandes centros comerciales: Alejandría, Calcuta, Lisboa y Venecia. Para los europeos de la época, los navegantes y descubridores por excelencia serán los portugueses. Opinión que persistirá, al menos, durante el primer tercio del siglo XVI, y a la que contribuirán no poco los libros de viajes, de gran éxito entonces.

Coincide ese período con el desarrollo de una corriente renacentista, que había empezado en las postrimerías de la centuria anterior, de recuperación de los textos clásicos de la materia médica (Dioscórides y Galeno) y de la historia natural (Aristóteles, Teofrasto y Plinio). Recuperación que consiste en depurar los escritos genuinos de esos autores mediante la comparación del alud de códices que vienen de Oriente, y que habían quedado, en la alta Edad Media, estropeados por las traducciones árabes incompletas y llenas de interpolaciones y, peor aún, por la versión de las traducciones árabes al latín en la baja Edad Media.

Ese movimiento de vuelta a las fuentes no se limita a un trabajo de preciosismo filológico, sino que promueve una serie de iniciativas e inquietudes que, en su desarrollo final, originarán la ciencia moderna en lo que a biología, medicina y minería se refiere. Así, defendíase que la pésima traducción de un texto terapéutico de Galeno, pensemos en un ingrediente fundamental de la triaca contra el envenenamiento, no sólo atentaba contra lo dicho por el famoso médico del siglo II, sino que podía acarrear la muerte del paciente por la acción de quien en él se había instruido. Urgía, pues, formar a los jóvenes médicos en los nuevos textos recuperados y arrumbar, o al menos dejar en segundo plano, los árabes hasta entonces dominantes: Rhazes, Mesue, Serapión y Avicena.

Tal expurgación de textos se hacía apremiante, efectivamente, en la farmacopea, en lo que entonces se llamaba materia médica, es decir, en las medicinas de origen vegetal y mineral sobre todo. Dioscórides, del siglo I, con su obra *Acerca de la materia medicinal, y de los venenos mortíferos*, como tradujo en 1555 nuestro Andrés Laguna, constituía la autoridad máxima a ese respecto y fue objeto de varias versiones al latín entre 1516 y 1518; al italiano y español, decenios después.

Ese trabajo no sólo demandaba tener buenos códices griegos de partida, sino también conocer exactamente a qué tipo de planta se estaba refiriendo el autor. Exigía, pues, dominar la flora del Mediterráneo, la única de la que se da cuenta. Para ello había que dejar la pluma y herborizar, lo que no siempre hicieron, sin embargo, los primeros traductores renacentistas. Al salir a los campos y montes vecinos se comprueba de inmediato que la riqueza vegetal es mucho más feraz que la sucinta recogida por Dioscórides. Además, muchas plantas de especies distintas recibían en éste una misma descripción morfológica imprecisa y austera. ¿A cuál aludía el médico anarzabeo? Las herborizaciones regulares, en la primavera, verano e incluso en otoño, determinarán que, a lo largo de ese siglo, asistamos a una constante corrección de las traducciones mencionadas y de las reelaboraciones que irán apareciendo.

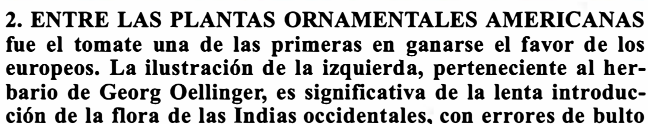
Poco a poco, el interés médico de

1. *NICOTIANA TABACUM*, o planta de la reina. Por su valor terapéutico y comercial, el tabaco constituyó durante siglos la planta emblemática de cuantas trajeron a Europa los descubridores del Nuevo Mundo. La pintura de la página opuesta, realizada hacia 1567 por un artista francés anónimo, es una de sus representaciones más antiguas. Se halla en una carta dirigida al botánico italiano Pier Andrea Mattioli, en cuya obra sobre Dioscórides bebió Andrés Laguna.









2. ENTRE LAS PLANTAS ORNAMENTALES AMERICANAS fue el tomate una de las primeras en ganarse el favor de los europeos. La ilustración de la izquierda, perteneciente al herbario de Georg Oellinger, es significativa de la lenta introducción de la flora de las Indias occidentales, con errores de bulto en un comienzo, como se desprende de la situación del fruto fuera de las inflorescencias. En la figura de la derecha, *Solanum lycopersicum* aparece correctamente dibujada en el herbario de Konrad Gessner, donde puede leerse la fecha de ejecución, 22 de septiembre de 1553.

la planta, del "simple" en cuestión, va dejando paso al interés botánico de la planta por sí misma, de lo que se empieza a llamar *res herbaria*. Ello conlleva una atención detenida a la raíz, al rizoma (tomado por raíz), al tallo aéreo, a las ramas, las hojas, las flores, las semillas y los frutos: número, disposición, lugar donde medra, formas, época de germinación, colores y demás. Y pronto, a finales de los años veinte y primeros de los treinta, a una comprobación nítida de que la flora de una región varía del tapiz vegetal de otra. Dicho de otra manera: la flora mediterránea o dioscorídea no es la misma que la de Alemania ni Dioscórides conoció toda la flora del sur de Europa y norte de Africa; la razón de la diversidad vegetal estribaba, habían escrito ya los clásicos grecolatinos, en la disparidad de suelos, clima y exposición.

Los centroeuropeos se dedican a confeccionar sus propias listas con la introducción de la terminología vulgar, en el marco de una explosión de nacionalismo, político y religioso, que nos lleva fuera del artículo. Pero no sólo los alemanes, y paralelamente ingleses, húngaros, polacos y holandeses, descubren su país respectivo. También el sur y el oeste se mueven por un afán herborizador sin precedentes.

Mientras tanto, España transformaba el conocimiento geográfico con el descubrimiento de la llamada *quarta pars* del mundo. Hasta entonces, la cartografía ptolemaica sólo dibujaba tres: Europa, Africa y Asia. Se trató de un proceso lento, de más de diez años de duración, que exigió el convencimiento de que Colón no había llegado a las Indias, sino que una enorme masa de tierra, un continente, se interponía en el camino. Y eso se estableció con las expediciones españolas a las costas orientales de Suramérica, en particular la brasileña por Amerigo Vespuccio (1501-1502). Por el norte, Juan Caboto llega a Terranova y costa adyacente de Norteamérica.

Hasta 1520 predominaron las expediciones de descubrimiento y exploración, que dejan el relevo, a partir de esa fecha, a los viajes de colonización y asentamiento, aunque no separados de una forma tajante. Además, las islas del Caribe, abarcadas por los cuatro viajes colombinos (1492-1504), no poseían, ni de lejos, el nivel de desarrollo azteca de Nueva España, cuya conquista por Cortés transcurre desde 1519 hasta 1523, ni la inca del Perú, que inicia Pizarro en 1532. Eso significa que el conocimiento de las "cosas del Nuevo Mundo", es decir, de su flora, su fauna, minería, geografía, sanidad, comercio, instituciones políticas y demás habrá de tardar todavía algunos decenios en llegar, de manera regular, a Castilla, y de aquí, a Europa. En efecto, hasta 1543 la corona española no establece la navegación transatlántica en convoy entre Sevilla y las Indias, y ese mismo año se

crea el Consulado de Mercaderes de la ciudad hispalense.

¿Quiere ello decir que la botánica americana no entra en las farmacopeas, agricultura y comercio europeos hasta mediados del siglo XVI? No exactamente. Colón, en su primer viaje, trae chile (*Capsicum* sp.) que, con las "avellanas purgantes" (quizá *Jatropha multifida* L.) y el guayaco (*Guaiacum officinale* L.), serán los primeros productos americanos en expandirse por España y Europa durante los años del descubrimiento, por razones muy distintas. Les seguirían el palo santo (*Guaiacum sanctum* L.), el clavel de Indias (*Tagetes* sp.) y el maíz (*Zea mays* L.).

El guayaco, o guayacán, era, a los ojos de los descubridores, una planta genuinamente "india", lo mismo que la enfermedad que sanaba: la sífilis. La fama del guayaco le vino por su eficacia antisifilítica; según lo visto hacer por los naturales de La Española, suponíase que la ingestión del agua procedente de la cocción de su madera limpiaba la sangre. Se admite, a falta de prueba más sólida, que los españoles trajeron la enfermedad venérea y promovieron los primeros brotes durante el asedio de Nápoles por las tropas francesas en 1494. En su retirada, en otoño de 1495, los soldados de Carlos VIII propagaron por la península italiana la enfermedad. De ahí su denominación de mal francés, mal napolitano o mal español. (El nombre de sífilis procede de una poesía didáctica escrita por Girolamo Fracastoro que lleva por título *Syphilis sive Morbus Gallicus*, en el que Apolo castigaba al pastor Sífilo con esa temida enfermedad.)

En torno a la naturaleza y terapia del mal francés, extendido muy pronto por toda Europa, se publicaron numerosas obras y se sucedieron varias disputas médicas, ya en los primeros diez años de acción de la epidemia. Pero hubo que esperar hasta 1546 para conocer el verdadero origen de esa rápida difusión, cuando el propio Fracastoro estableció la hipótesis del contagio, que explicaba todas las formas de peste: había organismos vivos, semillas de agentes productores de enfermedades, semillas que se transmitían de tres formas, a saber, por contacto directo, por portadores ocasionales como la ropa o el agua, y a través del aire a largas distancias. La propagación de la enfermedad avivó, desde comienzos de siglo, el comercio del guayaco, sobre el que las grandes familias asentarían su negocio; los Fugger llegaron incluso a prohibir un tratado de Paracelso que atacaba su uso desmesurado. La insuficiencia curativa de la planta americana indujo a recurrir al mercurio y, andando el tiempo, a otras especies exóticas de supuesta eficacia antivenérea, como la raíz de china (*Smilax china* L.), oriental, y la raíz de china americana (*Smilax pseudo-china* L.), amén de las plantas antivenéreas de la farmacopea tradicional.

La introducción del pimiento (*Capsicum* sp.) fue gradual. Sirvió primero de planta de ornamentación. Y retrasó su identificación el haberla confundido con la pimienta y con otras plantas agrupadas bajo la denominación única de "piper". A diferencia de lo que sería tradicional en los naturalistas de siglos posteriores, que daban un nombre nuevo a cada especie desconocida, el peso de Teofrasto, Dioscórides y Plinio inducía a los renacentistas a buscar el ajuste de la nueva en la nomenclatura y descripción de aquéllos. Se distinguía, además, erróneamente, entre pimienta negra y pimienta blanca. Al no encajar en ninguna de ambas, a los chiles americanos se les acabó por llamar "piper hispanicum" o "piper brasilianum", en el segundo caso por la opinión generalizada de atribuir el descubrimiento de América a lusitanos y españoles por igual.

Algo parecido ocurre con el maíz, al que se le adscribe primero entre los cereales conocidos (mijo y trigo) y se les da un origen oriental, y el clavel de Indias (*Tagetes* sp.), que se suponía una de las artemisias descritas por Dioscórides. Leonhart Fuchs denomina todavía en 1542 "Turcicum frumentum" al maíz, creyéndolo originario de Asia; aunque aporta ya una ilustración precisa, prueba de su familiaridad con el mismo.

La situación había comenzado a cambiar un tanto con la publicación en 1526 del *Sumario de la natural Historia de las Indias*, de Gonzalo Fernández de Oviedo, quien, en los apartados dedicados a los "árboles y plantas y yerbas que hay en las dichas Indias, islas y Tierra firme", describe el mamey (*Mammea americana* Jacq.), el guanábano (*Anona muricata* L.), la guayaba (*Psidium guajaba* Raddi), el coco (*Cocos nucifera* L.), las palmas (diversos géneros), pino de La Española (*Pinus occidentalis* L.), encinas (género *Quercus*), parras y uvas (género *Vitis*), higos del mastuerzo (*Carica cauliflora* Jacq., la papaya), membrillos (sin identificar, no es, por supuesto, ninguna especie de *Cydonia*, ni parece corresponder al mebrillo de montaña, el más plausible, *Gustavia augusta* DC.), perales (*Persea gratissima* Gaertn., el aguacate), el higüero (género *Crescentia*, la güira, cuajate o jícaro), los hobos (*Spondias lutea* L., los jobos o mombines), palo santo (género *Guaiacum*), jagua (*Genipa americana* L.), manzanas de la yerba (*Hippomane mancenilla* L.), árboles grandes (quizá *Casearia pentandra* y otras de porte parecido), cañas (*Gynerium sagittatum* Beauv.?), plantas y yerbas (entre otras, *Ipomea bona-nox* o "hierba Y", *Batatas edulis* Choisy o batata, *Cucurbita pepo* L. o calabaza, *Cucumis anguria* L. o cohombro, *Ananassa sativa* Lindley o piña, *Musa sapientum* Brown o plátano, *Opuntia ficus-indica* o tuna nopal y *Heliconia bihai* L., bihao o platanillo).

La difusión del *Sumario* de Oviedo se ve favorecida con su inmediata traducción al latín y, unos años más tarde, a principios de la década de los treinta, al italiano. Toscana constituye, en ese período, el centro del saber botánico. En Ferrara, por ejemplo, se forma Euricius Cordus, fundador de la botánica alemana. (La peregrinación a las universidades italianas era obligada por los humanistas europeos. El principal representante de la Facultad de Medicina de Montpellier, Guillaume Rondelet, debe a ese viaje su inclinación por la nueva botánica.)

Pero, si bien algunas plantas americanas deben su resonancia europea a su inclusión en la obra que me parece central para la materia médica del Renacimiento, es por culpa de la misma por la que su difusión no fue mayor. Me refiero al libro de Antonio Musa Brasavola *Examen omnium simplicium medicamentorum, quorum usus est in publicis disciplinis et officinis* ("Examen de las medicinas simples que están en uso en la enseñanza y en las boticas").

Brasavola, algo más joven que Cordus, a quien conoció en sus años de estudiante, era un médico al servicio primero de Alfonso de Ferrara y, a la muerte del duque, de su hijo heredero Ercole d'Este. En el *Examen*, Brasavola repasa una a una todas las plantas recogidas en los herbarios tardomedievales, más las que se han ido incorporando con los comentarios a Dioscórides y otros escritos de comienzos del siglo XVI. (Los herbarios que usaban los boticarios eran unos compendios alfabéticos de plantas comunes, que recogían los sinónimos, daban una descripción sumaria del vegetal, es-

tación y lugar de recolección y posología a aplicar de una parte o derivado del mismo de acuerdo con la teoría galénica de los humores y sus grados. Entre los cuatro o cinco más socorridos por médicos y boticarios destacaban el de Simón de Génova y el de Mateo Silvático, de finales del XIII y principios del XIV, respectivamente.)

El objeto del tratado de Brasavola se centra en las plantas que se venden en Venecia y Génova y, desde esos mercados centrales, son expedidas a toda Europa. La puerta de entrada de las especies procedentes de España eran el puerto de Génova, desde donde llegaban a Ferrara, ciudad de los destinatarios de la obra, y a otros puntos de Italia en mulos.

Al médico áulico le interesaban sobre todo las que arribaban, de Oriente, a Venecia. Por varias razones. Primera, eran, las del Mediterráneo y Oriente próximo, las conocidas por Dioscórides y los autores clásicos. Segunda, frente a la llegada irregular de los barcos catalanes y valencianos, Venecia tenía correo regular con Alejandría, puerto donde convergían las mercaderías de Oriente próximo, Oriente medio y Oriente lejano; estas últimas, especias sobre todo, venidas en caravanas desde el mar Rojo. (Había otra línea regular por la península balcánica, así como barcos de línea a otros puertos del Mediterráneo, en particular, Creta y Chipre.) En tercer lugar, la propia reticencia del toscano hacia España y su proclividad hacia el trono de Francia, que le hacía minusvalorar los logros castellanos y andaluces en favor de los lusitanos, hasta el punto de atribuir a éstos cualquier nueva tierra descubierta. Por último, esos años coinciden con el resurgimiento minero de Alemania, que abastece a Venecia y a Italia de los minerales empleados en farmacia.

El *Examen* de Brasavola, publicado por primera vez en 1536, se expandió rápidamente por Europa, aunque entonces los libros solían tardar bastante en llegar a los anaqueles universitarios y privados. Juan Agrícola Ammonio, puente entre la cultura botánica italiana y la naciente germánica, copia en 1539 párrafos enteros del ferrarense, en concreto, los relativos a los productos de las Indias (distintas especies de guayaco y pimientos). Los dos botánicos alemanes precedentes, Euricius Cordus y Otto Brunfels, se habían ceñido, de forma casi exclusiva, a la flora nacional.

Agrícola nos sitúa, pues, en los años cuarenta, cuando su influjo en Leonhart Fuchs, autor de una notabilísima obra sobre el reino vegetal, sirve de trampolín para su proyección centroeuropea, prolongado por Valerius Cordus y Rembert Dodoens, e insular británica, a través de William Turner. Pero todavía no se distingue con nitidez el lugar de origen de las nuevas especies, que se suponen "indias" y que por inercia se atribuye su traída a los portugueses. El propio adjetivo "hispanum" concedido al pimiento se diluye en la confusión de lo relativo a la península Ibérica. Tampoco acaba de deslindarse, salvo en el caso del gua-





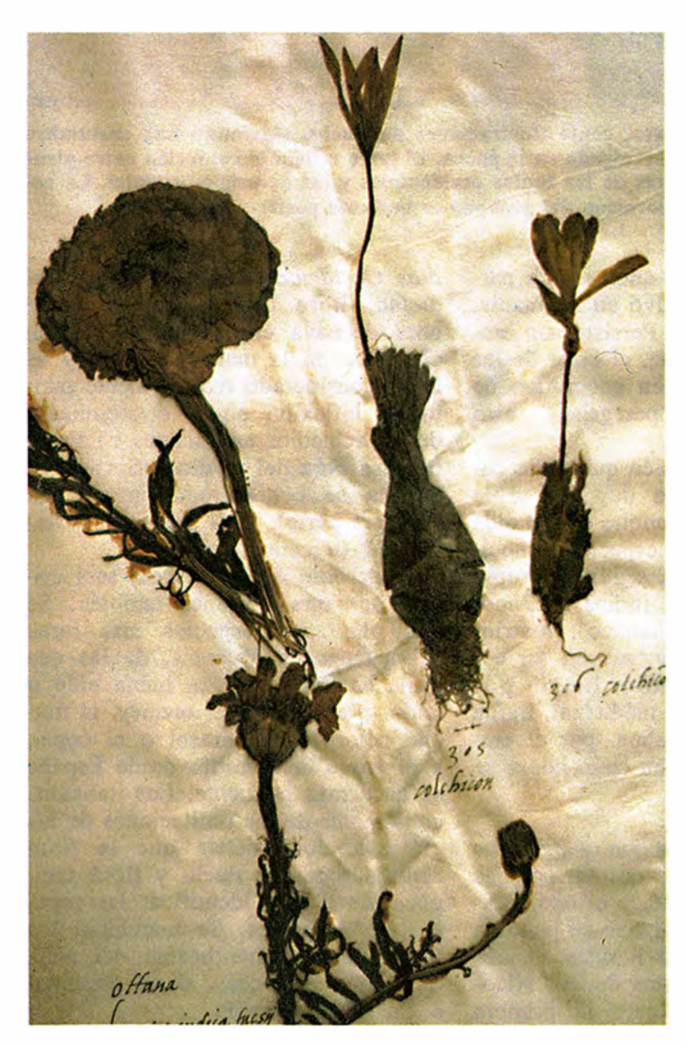
3. LOS HERBARIOS RENACENTISTAS, llamados *horti sicci*, desempeñaron un papel destacado en la difusión de las plantas que venían de América. Aquí se muestran los pliegos más antiguos que se conocen de pimiento, tomate y clavelón de Indias,

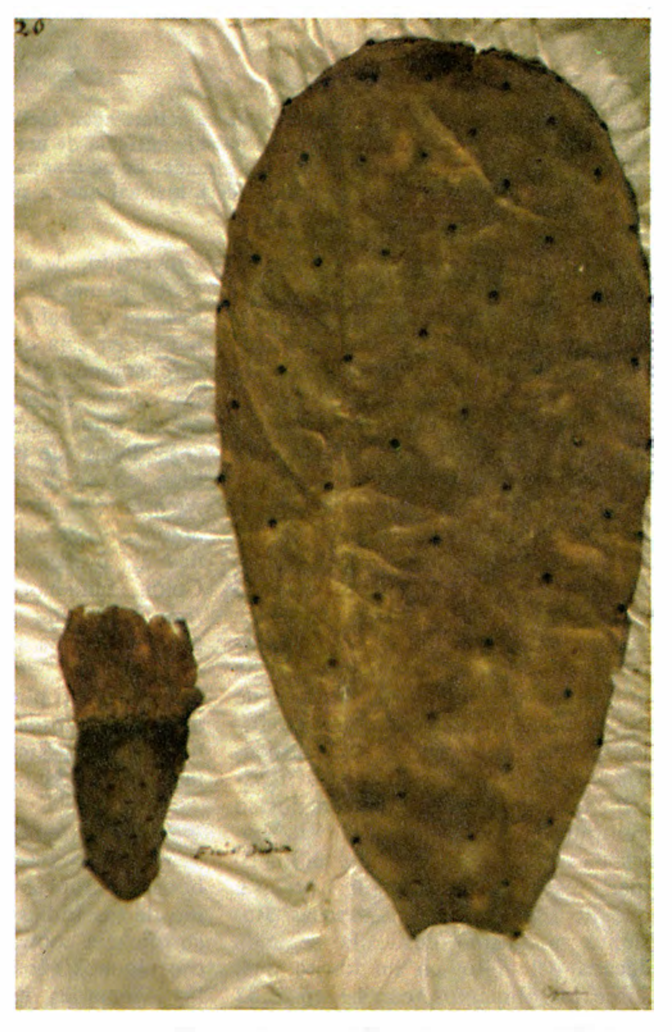
yaco, su naturaleza absolutamente distinta de cualquier planta conocida por los clásicos grecolatinos y los árabes, freno en el que tiene que ver la persistencia en asignarle el mismo nombre de plantas mencionadas por éstos.

Al comercio cada vez más frecuente desde España en esos años cuarenta (Sevilla se ha convertido en otra plaza fuerte comercial) y la divulgación escrita de las nuevas especies, hemos de agregar un tercer factor que apuntala la presencia de la flora americana en Europa: los jardines botánicos. Menudean en las casas nobles italianas, en los monasterios y, pronto, en las universidades. Diez años antes, Brasavola había recibido terrenos del duque de Ferrara para sembrar en él todas las especies de interés farmacológico. Se trata en un comienzo de disponer de todas las especies necesarias para cumplir con rigor la terapéutica indicada en los libros de Galeno. Pero muy pronto ese afán se torna coleccionista y se persiguen las "rarezas", empeño que activa un intercambio y una búsqueda de ejemplares nuevos por doquier, hacia España también.

Por fin, la perfección del dibujo, en el ejemplo del "áloe" (*Agave americana*) de Fuchs, pondrá en ese decenio otro basamento para una mejor recepción de la flora de las Indias occidentales. (Las ilustraciones de los herbarios, lo que se llamará *horti picti*, hasta entonces más o menos estilizadas y fantaseadas, habían comenzado a cambiar, a convertirse en imágenes vivas de las plantas, desde que Hans Weiditz preparara los dibujos para los *Herbarum vivae eicones* de Brunfels, de 1530. El interés del dibujo para la comprensión del vegetal fue reconocido por el propio Fernández de Oviedo cuando desea que estuviera *in situ* Leonardo da Vinci, a quien había conocido en Italia, para pintar las plantas recién descubiertas.) En su *De historia stirpium* de 1542, Fuchs ilustra con fina exactitud el clavel de Indias, el maíz, la guindilla de Indias y el pimiento, pero la explicación textual deja bastante que desear, deficiencia que se subsana en parte con su paisano Hieronymus Bock. Por esos años cuarenta se ha expandido también el tomate (*Solanum lycopersicum*), que persistió durante años como planta ornamental de alféizares y topiarios.

Ya en los primeros años cincuenta, exactamente en 1552, Luca Ghini, fundador en Pisa del primer jardín botánico universitario e instaurador de la práctica de los pliegos de herbario (el llamado *hortus siccus*) como método de enseñanza y de correspondencia entre botánicos, le escribe a Ulisse Aldrovandi sobre la presencia de especialistas en materia médica idos a España en busca de simples. (De nuestro país llega a Italia a comienzos de esa década otra planta, transmitida ésta por los árabes; hablamos de la alfalfa, *Medicago sativa*, que había desaparecido de Europa.) La comunicación epistolar constituye, en efecto, el vehículo





pertenecientes al Herbario Real de Leyden. La pala de nopal de la derecha, reseca tras haberle extraído la parte carnosa, se encuentra en el herbario de Leonhard Rauwolf que se conserva en la citada colección holandesa.


CAPSICVM. 181
Κάπσικον.
Actuario & Græcorum re centioribus no minatur, Pli nio Siliqua strum & Pipe ritis. Auicen næ vt putatur Zingiber cani num, recentio ribus Piper In dianum, Piper Calecuthium, & Piper Hi spanum. Ger. Indiani scher pfeffer vnd Calecuthi tischer pfef fer. Brabā. Pe per van In diē ende Bre sillie peper. Gall. Poyure d'Inde.
m iij


10 MILIVM INDICVM.
Peregrinum hoc frumen ti genus Pli nio Miliū In dicum dici tur, Recenti oribus, Fru mentum Tur cicum, Sarra cenicum & Asiaticum. Germanis Turkisch korn. Brabantis Torcke co ren. Gallis Bled Sarasyn, & Bled de Torquie. Neronis principatu in Italiam in uectum est, inquit Plini us.

4. PIMIENTO Y MAIZ, dos plantas que se aclimataron fácilmente en Europa, hasta adueñarse del paisaje agrícola de muchas de sus regiones. Los grabados están tomados de un manual de campo de Rembert Dodoens (1553-1554), manual que, a su vez, copia ilustraciones de Fuchs, siguiendo una costumbre arraigada en la época. El texto refleja la confusión entre plantas de las Indias occidentales y las de origen oriental. La coloración del grabado es bastante posterior.

habitual de transmitir las novedades; y por el rastreo de la misma sabemos ya la inquietud de las farmacopeas de los nobles, en los años cincuenta, por adquirir productos de ambas Indias. De no poder navegar directamente hacia el lugar donde crecen se quejaba, por ejemplo, el farmacéutico de Cosimo I.

Pero no sólo los simples, es decir, las plantas curativas. Mediada la década de los cuarenta, Pier Andrea Mattioli había dado cuenta del uso culinario en Italia de la calabaza (*Cucurbita pepo*). En el aspecto ornamental, la pita fuchsiana se ha propagado por todos los jardines de esa península, lo mismo que los fríjoles (*Phaseolus* spp.); por Centroeuropa, la tuna o nopal (*Opuntia ficus-indica*), que llama la atención por su multiplicación desgarrando "las hojas", es decir, las palas del tallo. El maíz recibe una descripción precisa, que no tenía en las numerosas alusiones al mismo desde la segunda década del siglo, en un librito que, sobre los alimentos, escribe en 1552 el médico de Malinas Rembert Dodoens, quien corrobora que se ha convertido, de unos años a esta parte, en planta de cultivo en Alemania, Francia y Brabante. Persiste, sin embargo, en esta década, el error de las asignaciones al origen geográfico de las nuevas plantas "peregrinas", esto es, de otras tierras.

Dodoens fue también quien dio cabida en su herbario de 1553 a la *Nicotiana rustica*, aunque confundida entonces con otras especies conocidas. La especie que, según el propio Colón, fumaban los indios es *Nicotiana tabacum* (el tabaco); restringida a medios marineros en un comienzo, se extendió luego por Europa como planta medicinal, traída a Francia, desde Lisboa, por el embajador Jean Nicot, en cuyo honor se latinizó la planta.

Entre los remedios que, a primeros de los sesenta, corren por las boticas europeas destaca el opobálsamo de las Indias, del que se pondera su eficacia contra las heridas. Ocurre eso algunos años antes de que Nicolás Monardes escribiera la primera parte de su *Historia medicinal de las cosas que se traen de nuestras Indias Occidentales que sirven en medicina*, libro que se reputa como obra decisiva en la fundamentación científica de la materia médica y se le ha considerado recientemente punto de inflexión en el conocimiento de los remedios americanos en Europa. Esa obra del médico afincado en Sevilla se confeccionó entre 1565 (primera parte), 1571 (segunda parte) y 1574 (tercera parte).

El decenio de los sesenta será crítico por otras razones también. Se van plantando especies más raras aclimatadas en Valencia, de las que hasta entonces sólo se había oído o leído, por ejemplo el mamey, el muche colorado, el girasol o el copal, y el envío de semillas desde España se hace más frecuente. Los italianos, conscientes de las limitaciones de los clásicos, comprueban que la flora centroeuropea de Fuchs y Bock tampoco sirve para identificar las especies meridionales. Se marchitan los viejos tópicos que hacían del maíz una planta sarracena, si no presentada al mismo Nerón.

Ocurre todo ello inducido, en buena medida, por un acontecimiento en

dos tiempos que permitirá deslindar lo que realmente nace en las Indias orientales de lo que es endémico de las occidentales. En un primer paso, García d'Orta, médico portugués que había estudiado en Salamanca y con Nebrija en Alcalá, publicó en Goa, en 1563, sus *Colloquios dos simples e drogas he causas medicinais da India*, donde expone la materia médica peculiar de la India, Ceilán y zonas vecinas, comparándola con las fuentes clásicas y recientes según era uso. Charles de l'Escluse (Clusius) la difunde por Europa en una abreviada traducción al latín en 1567. En un segundo avance, Monardes saca la primera parte mencionada más arriba. Orta y Monardes gozan de la autoridad suficiente para que se acepte el nuevo escenario, pues se trata de expertos en la materia, y no cronistas de Indias sin capacidad diagnóstica de los reinos de la naturaleza, historiadores que habían aportado las primeras referencias, algunos, dicho sea en justicia, con voluntad de precisión, como la *Historia General y Natural de las Indias* de Fernández de Oviedo.

La etapa siguiente, la de los años setenta, no hace más que respaldar lo ya admitido y disipar las postreras neblinas. El propio nombre de Indias occidentales comienza a caer en desuso por el más directo de América, lo que implica que el calificativo "indicum", que ayudaba a mantener la confusión, dejará paso al inequívoco "americanum". (La ambigüedad se ceñirá ahora al lugar exacto, por lo que no es raro ver asociado lo "bresilicum", o brasileño, a lo "hispanum".) Europa, que maneja el epítome latino de Clusius de los *Colloquios* de García d'Orta, se encuentra, en los años centrales del decenio, con los primeros manuales bastante completos de lo verdaderamente valioso, para su propia farmacopea, de uno y otro confín del mundo: *Primera y Segunda y Tercera Partes de la Historia Medicinal de las Cosas que se traen de nuestras Indias Occidentales, que sirven en Medicina,* de Monardes, y el *Tractado de las Drogas, y medicinas de las Indias Orientales, con sus Plantas debuxadas al bivo*, de Cristóbal Acosta, ambas traducidas al latín por Clusius. Acosta, que se apoya estrechamente en el libro de Orta, mostrará especial interés, de paso, en denostar a Brasavola, cuya influencia, y freno, ha pesado hasta entonces.

Monardes distingue en la segunda y tercera partes, aunque todavía someramente, el origen peculiar de la planta o extracto de la misma, si Nueva España, Perú, Tierra Firme o las islas antillanas. Se ocupa, entre otros, del copal, liquidámbar, china, guayacán, zarzaparrilla, tabaco, sasafrás, bálsamos, granadilla, girasol, batatas, coca, piña y guayabo. Orta y Acosta, por su lado, pormenorizan los clavos, tamarindo, cánfora, ámbar, turbit, negundo, mangas, sándalos, nuez moscada, opio, cardamomo, etcétera. Coinciden uno y otros autores en abordar la cañafístola, higuera de las Indias, pimienta, avellanas, ananás, jengibre, china, ruibarbo y canela, nombres comunes dados a especies distintas que cumplían similar función terapéutica.

Por lo común, Monardes tiene ante sí el libro de Orta y Acosta introduce anotaciones de Monardes, como puede verse a propósito de la piedra bezoar, remedio "simple" de origen orgánico (concreción calculosa que se forma en el aparato digestivo de algunos rumiantes) contra los envenamientos. Amén de traducir esos escritos de Orta, Monardes y Acosta, Clusius se esmera en poner de manifiesto la paternidad del origen y su distinción de otras especies habituales en el Viejo Mundo: "se le llama española a la zarzaparrilla porque los españoles la trajeron del Perú a Europa y no tiene nada que ver con la esmílace áspera como pretenden algunos."

La recepción en España de la botánica americana en las décadas de los cincuenta y los sesenta no se ciñe exclusivamente al comercio de las nuevas especies de interés médico. Laguna se lamentaba en el pórtico de su *Dioscórides* de la inexistencia de jardines botánicos en la península, carencia o incuria que contrastaba con la proliferación en la Europa que él conocía; pero Laguna, dentro de su cosmopolitismo, dependía demasiado de los autores y mercados italianos y no valoró adecuadamente la importancia de la aportación hispana.

En 1550 el entonces regente Felipe II crea el primer "arboretum" (arboledas de distintas especies) en Aranjuez, jardín botánico que a lo largo de esa década y las siguientes se irá extendiendo por otros lugares. Y aunque el interés botánico de la universidad española arrancaba desde los años fundacionales de Alcalá, la de Valencia le dio especial impulso desde la segunda mitad del decenio de los cuarenta, con cátedra, jardín y herbario que se inserían en la corriente avanzada de la Toscana, más arriba aludida. Valencia se convierte así, en los años cincuenta y sesenta, en puente con Italia, por vía mercantil (semillas) y por intercambio epistolar sobre las novedades aclimatadas. Clusius, en los sesenta, tras su viaje por la península acompañando a Jacobo Fugger, se erigirá, asimismo, en eficaz propagandista por Europa de la labor investigadora de los botánicos de Valencia y Sevilla.

Sabido es que la medida principal que Felipe II tomó con relación a la botánica se personaliza en la expedición de Francisco Hernández a Nueva España (1571-1577). Traía, a su vuelta, simientes, raíces, plantas vivas en barriletes, pliegos de herbario, pinturas y láminas con textos en castellano y casi la tercera parte en náuatl. Todo ello en número sobreabundante. Aunque no se publicó, y abreviada, hasta la centuria siguiente, su alcance llegó en 1586 a oídos de los botánicos italianos, a través de la embajada de los Médici en la corte española.

Mas, para entonces, la flora americana había entrado ya con pleno derecho en el primer tratado científico de la botánica sin la acostumbrada servidumbre médica: *De plantis libri XVI* ("Dieciséis libros sobre las plantas"), de Andrea Cesalpino, publicada en 1583, donde los géneros americanos se incardinan en la primera sistemática general. Esta obra y la inmediata *Historia general de las plantas* de Dalechamps (Lyon, 1586-1587) culminan el proceso de madurez de la botánica europea, que nació justamente por los años finiseculares del Descubrimiento y da remate con la universalización del mundo vegetal conocido, teniendo por autoridad a dos españoles: de las Indias occidentales a Monardes, de las orientales a Cristóbal Acosta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LANDMARKS OF BOTANICAL HISTORY. Edward Lee Greene. Edición preparada por Frank N. Egerton con la colaboración de Robert P. McIntosh y Rogers McVaugh. Stanford University Press, 1983.

LA TEORÍA BOTÁNICA DE JEAN RUEL (Ruellius, 1474-1537). J. M. Valderas en *Collectanea Botanica*, vol. 17 n.º 2, págs. 273-288; 1988.

LA HISTORIA MEDICINAL DE LAS COSAS QUE SE TRAEN DE NUESTRAS INDIAS OCCIDENTALES (1565-1574). Nicolás Monardes. Introducción de José María López Piñero. Ministerio de Sanidad y Consumo. Madrid, 1989.

BOTANY IN MEDIEVAL AND RENAISSANCE UNIVERSITIES. Karen Meier Reeds. Garland Publishing, Inc. Nueva York, 1991.

Ciencia y empresa

Automovilismo

Infrarrojos para conducción nocturna

En la reciente guerra del golfo Pérsico se hizo famoso el carro M1, del ejército de los Estados Unidos. Equipado con detectores de infrarrojo para descubrir blancos y fuerzas enemigas, gracias a él la caballería aliada pudo entrar en combate en condiciones de oscuridad absoluta. Por la adquisición de tan exóticos dispositivos de reconstrucción térmica de imágenes, la pagaduría militar abona más de 100.000 dólares la unidad.

Pero hay ya dos empresas dispuestas a fundir las espadas electrónicas en rejas de arado. Texas Instruments y Honeywell trabajan en el desarrollo comercial de sistemas infrarrojos con fines civiles. Antes del doblar el siglo, podrían venderse en las tiendas por el precio de un equipo de alta fidelidad; se aplicarían en sistemas de visión nocturna para automóviles, sistemas de seguridad para el hogar y aparatos para descubrir fugas de aislamiento.

Una y otra compañía han disfrutado, durante más de cinco años, de contratos oficiales para la creación de nuevas cámaras infrarrojas, ligeras y baratas, acoplables al fusil M16. Se trataba, obviamente, de un secreto militar, que acaba de levantarse con la esperanza de su abaratamiento dado su enorme mercado potencial en usos civiles.

Aprovechando su experiencia en la fabricación de circuitos integrados, Texas Instruments y Honeywell construyeron una micropastilla con 80.000 elementos detectores térmicos, cada uno de los cuales aprecia variaciones de temperatura (radiación infrarroja) de una décima de grado Celsius o menos. Dada su sensibilidad y habida cuenta del notable contraste entre píxeles térmicos, esos aparatos ofrecen imágenes de cierto sabor ultramundano, capaces de mostrarnos los rasgos faciales y las arterias del cuello, así como producir "impresiones térmicas", huellas del calor que se deja al tocar un libro u otro objeto.

Esas cámaras alcanzan sólo una décima parte de la sensibilidad térmica que poseen los dispositivos incorporados en un carro M1 o en un avión militar. Tales detectores cuánticos, así se les llama, se fabrican de telururo de mercurio y cadmio. A diferencia de las cámaras que pronto se comercializarán, los detectores de telururo de mercurio y cadmio requieren sistemas criogénicos costosos y son de mediocre eficacia para eliminar el ruido térmico.

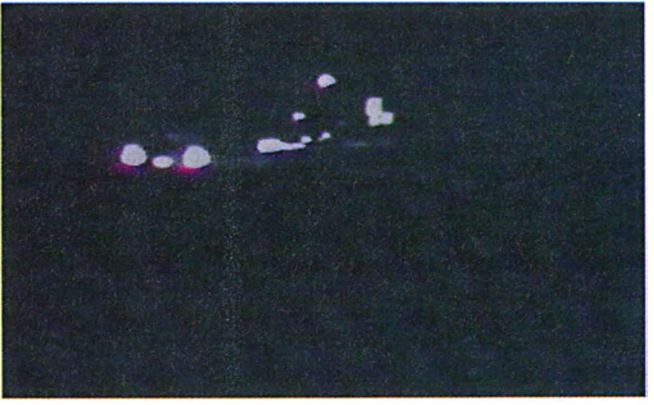
El dispositivo de Honeywell constituye una aplicación de cierto proceso de fabricación relativamente nuevo: el micromaquinado de superficies. Haciendo uso del fotolitografiado, quimigrabado y otras técnicas de la fabricación de circuitos integrados, el micromaquinado de superficies esculpe el silicio en estructuras suspendidas en una micropastilla. Honeywell quimigrabó una parrilla de 336 por 240 píxeles a partir de óxido de vanadio. Cada píxel, que mide unos 50 micrometros por lado, se sitúa entre las estructuras de soporte mediante postes finísimos que canalizan la entrada y salida de corriente del detector. Configuración que asegura, al propio tiempo, el aislamiento térmico.

La imagen se enfoca sobre el conjunto de detectores mediante lentes de infrarrojo. En la pastilla, el transistor, uno debajo de cada píxel, abre y cierra la corriente eléctrica 30 veces por segundo. Cualquier cambio en la radiación térmica incidente alterará la resistencia del óxido de vanadio, que a su vez modificará la intensidad de la corriente.

Texas Instruments ha optado por una técnica basada en una cerámica de titanato de bario y estroncio. Del quimigrabado de los píxeles se encarga un láser, del tipo de los que se emplean en la fabricación de semiconductores para cortar resistencias y condensadores. La cerámica es un material ferroeléctrico, en el que la carga eléctrica varía cuando se somete a un campo eléctrico o —en el caso de esta pastilla— a variaciones de temperatura. Cuando un píxel se calienta o se enfría, su variación de carga, o capacitancia, se detecta en diversos elementos del circuito.

De entrada, el proceso de manufactura de Honeywell resulta en potencia menos costoso que el grabado por láser, pues se funda en métodos normalizados de fabricación de micropastillas. Texas Instruments, que trabaja en una línea de producción similar, ha logrado acercar más su cámara a la fase de comercialización: ha comprimido lentes, detectores y la electrónica de procesado de la señal en una caja única de menos de dos





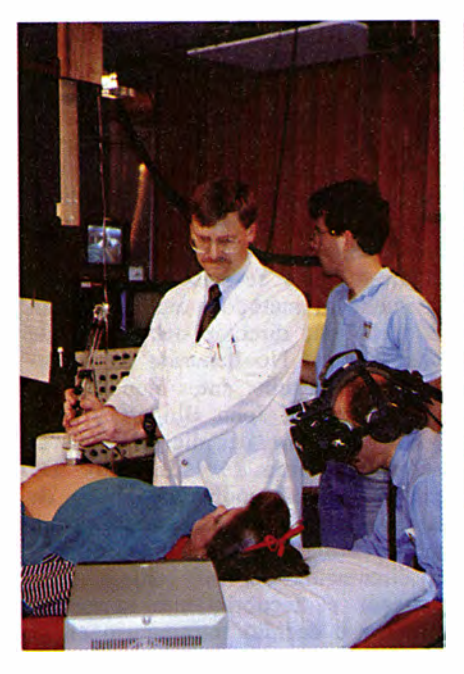
Minneapolis al anochecer, en imagen obtenida con una cámara infrarroja Honeywell montada en un automóvil (izquierda). *Las luces de los coches a distancia, tal como se ven a través del parabrisas, se muestran en la fotografía de la derecha.*

kilogramos. El sistema de Honeywell consta de varias cajitas conectadas por cables.

Ambas compañías, Texas Instruments y Honeywell, operan en estrecho contacto con una importante empresa automovilística, aunque ninguna de ellas quiere dar más detalles. (Texas Instruments tiene un acuerdo de cooperación con General Motors y su subsidiaria para asuntos de la defensa, Hughes Aircraft.) La instalación de una pantalla de dicha cámara en el salpicadero no sólo duplicaría el campo horizontal de visión que permiten los faros del automóvil, de 15 a 30 grados, sino que también incrementaría el alcance visual del conductor, desde un escaso centenar de metros hasta un kilómetro.

El interés se ha extendido entre las compañías de seguros, que podrían emplear cámaras detectoras de "puntos calientes" en las paredes de las casas, producidos por una instalación eléctrica defectuosa. Las cámaras infrarrojas podrían tener acomodo en los sistemas de seguridad de los hogares, en la lucha contra la droga, en el trabajo policial y en las patrullas de vigilancia de fronteras. Por esa misma causa, el ejército se resistió a levantar el secreto, temeroso de que esos medios acabaran en manos de traficantes y terroristas.

La ulterior miniaturización de los sensores y de la electrónica podría obtener gafas infrarrojas para darse un paseo por la más cerrada de las noches. Los tipos actuales de gafas de visión nocturna se limitan a reforzar la luz de la luna o de otras fuentes de baja iluminación, y de nada sirven en la obscuridad total.





El mundo interior, revelado gracias al empleo de una pantalla montada en la cabeza (izquierda) *que podría un día permitir al médico ver en el interior del abdomen* (arriba).

Realidad virtual

Introducción en cirugía

El sueño secular de ver a través de objetos sólidos, idea de generosa aplicación en las novelas de fantasía científica, empieza a tomar tierra... virtual. Henry Fuchs, profesor de ciencias de la computación en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, con dos alumnos de segundo ciclo, Mike Bajura y Ryutarou Ohbuchi, se han fijado en la técnica que crea entornos simulados y controlados por ordenador para desarrollar lo que pudiera ser el precursor de las gafas con "visión de rayos X".

De momento, esa visión es por ultrasonidos, no por rayos X. Los investigadores se calaron una suerte de casco para superponer imágenes ultrasónicas de un feto sobre la videoimagen del abdomen de una mujer embarazada. El vídeo, proyectado en una pantalla de cristal líquido dentro del casco, muestra lo que el observador vería normalmente. La imagen ultrasónica, colocada sobre la videoimagen del abdomen, proporciona una ventana hacia el interior del cuerpo.

Con tal sistema, un médico podría obtener una perspectiva espacial muy exacta de la posición de una sonda en el interior del cuerpo. Para realizar una amniocentesis, por ejemplo, el médico debe efectuar la difícil correlación visual entre el sonograma proyectado en un monitor de vídeo junto al lecho y la posición verdadera de una aguja al perforar la cavidad uterina y penetrar en el saco amniótico. De manera análoga, los médicos que realizan una biopsia de aguja podrían guiarse con mayor precisión asomándose a la ventana ultrasónica.

La técnica difiere de la mayoría de las formas precedentes de realidad virtual en que el observador contempla un mundo de fantasía de imágenes gráficas tridimensionales generadas por un ordenador.

Fuchs y sus alumnos han dado un paso más al añadir, en la realidad virtual, imágenes del mundo real. En la primera prueba, realizada en una paciente voluntaria en su 38 semana de embarazo, el observador que portaba el casco de la realidad virtual atendía al vídeo, mientras que un ayudante movía un instrumento de exploración ultrasónica sobre su abdomen para producir imágenes bidimensionales del feto. Las imágenes ultrasónicas se proyectaban sobre el vídeo con su orientación espacial correcta. La coordinación de las imágenes se hizo posible gracias a un sensor magnético instalado en el techo, que seguía la posición de la cabeza del investigador y del dispositivo de exploración ultrasónica. Las diferentes imágenes, con sus coordenadas espaciales correctas, se combinaban mediante un ordenador especial de procesado de gráficos.

El refinamiento del sistema podría convertirse en una poderosa herramienta en manos de los médicos. Pero el grupo de Carolina del Norte debe primero resolver las dificultades de fundir diferentes clases de imágenes en vivo. Los primeros sistemas se encontraban con la dificultad de que la imagen ultrasónica parecía pegada artificialmente sobre el abdomen. El grupo de Fuchs sorteó el problema creando un "agujero virtual" en el cuerpo de la paciente: se instala un sonograma en el interior de lo que parece un hueco apropiado, construido con gráficos tridimensionales.

El observador ve la imagen mixta vídeo-ultrasónica con el ojo izquierdo (la parte derecha de la pantalla de cristal líquido está inactiva). La imagen se acercará más a la realidad cuando se coloque una segunda cámara en el casco para producir una imagen estereoscópica. La representación ultrasónica procede también de una exploración bidimensional, si bien hay instituciones que laboran en el campo de las imágenes ultrasónicas tridimensionales. Lo que el observador aprecia en la representación ultrasónica es una delgada

rebanada de imagen gris sobre un fondo negro que está suspendido en el espacio. "Es como mirar por el agujero de la cerradura", dice Fuchs.

Importa también mejorar la resolución en la pantalla del casco y se precisa un sistema perfeccionado para seguir el movimiento del sensor, que pueda predecir hacia dónde se moverá la cabeza del paciente, para que la imagen ultrasónica proceda acompasada a la imagen del vídeo.

Se obtendrán imágenes mejores y más rápidas con la creciente velocidad del ordenador especializado en gráficos que se usa para crear las imágenes. La Universidad de Carolina del Norte tiene uno de los más potentes ordenadores del mundo dedicado a la presentación de imágenes gráficas en tiempo real. Llamado Pixel-Planes 5, es un ordenador paralelo que contiene más de 320.000 procesadores de un bit.

Las posibilidad de la visión virtual no quedan circunscritas al ámbito de la medicina. Con una imagen que combinara vídeo y radar milimétrico veríamos a través del humo de un edificio en llamas, lo que nos permitiría proceder al salvamento de los atrapados.

Cerámicas

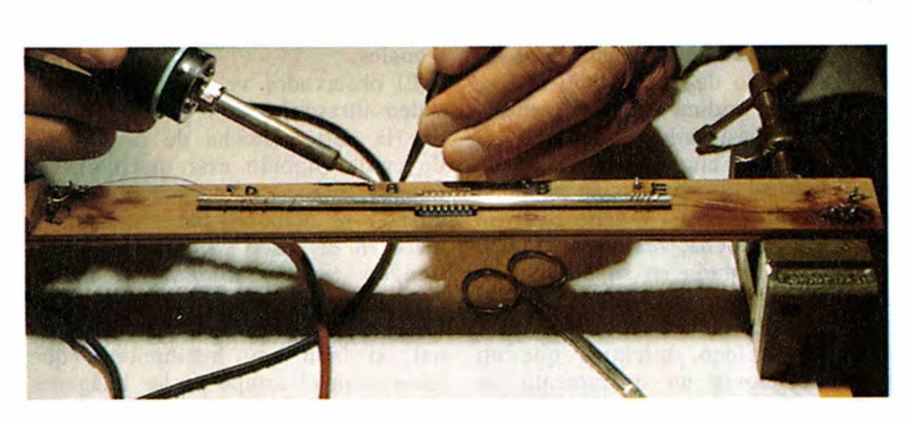
Con forros de plata

La suerte visitó el Centro de Tecnología de Superconductividad del Laboratorio Nacional de Los Alamos. Se trabajaba en un nuevo método de fabricación de cables. Comprimiendo polvo de cerámica superconductora en un tubo de plata y después calentando y estirando, se había logrado soldar el material y formar un hilo sólido. Por desgracia, su cable sufría de los mismos defectos fundamentales que presentaban los otros procedimientos. Para conducir la electricidad sin resistencia, el cable habría necesitado un engorroso envoltorio de transporte de nitrógeno líquido. Tampoco habían resuelto la dificultad más grave: las grietas. Apretando el hilo hasta forjar una cinta se lograba algo más de estabilidad, pero no podía soñarse todavía con la explotación comercial.

"De repente se nos ocurrió darle la vuelta al método", recuerda Dean E. Peterson, director del centro de Los Alamos. No llenarían de superconductor el tubo; antes bien, él, David Korzekwa, John Bingert y Haskell Sheinberg decidieron usar la cerámica como revestimiento. De esta manera se podían beneficiar de la resistencia mecánica natural de un tubo y utilizar el interior vacío para la circulación del refrigerante. Para proteger el recubrimiento superconductor, se decidió introducirlo en el interior de otro tubo concéntrico de plata; las tres capas se soldarían por calentamiento y el conjunto se alargaría por tracción.

Han comprobado que su tubo dentro de un tubo forma un cable de mayor resistencia y más sencillo, que promete un óptimo comportamiento en el mundo real. Puesto que las capas metálicas protegen la cerámica por dentro y por fuera, el superconductor habrá de poder soportar los rigores de transporte e instalación. A diferencia de los alambres o cintas sólidos, sensibles a las roturas por impacto, en la nueva situación las grietas deberán rodear por completo el tubo para impedir el paso de la corriente.

El grupo espera realzar la capacidad conductora apilando capas concéntricas, a modo de anillos del tronco de los árboles. Aunque podrían fabricar kilómetros de cable de cualquier diámetro, no les resultará fácil unir secciones de cable de varias capas: cualquier defecto de alineación causaría pérdida de energía.



Cable superconductor fabricado en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, que se beneficia de la geometría tubular. Foto: Fred Rick.

La elección de una cerámica de matriz de bismuto ha sido decisiva para el éxito del tubo. Cuando se ensayó con polvos cerámicos basados en itrio, la plata se fundió antes de que el material formase la estructura plana necesaria para la superconductividad. Otros metales (oro, cobre, acero y platino) anularon la capacidad superconductora de la cerámica.

Farmacología

Membranas de poro fino

No hace falta remontarse mucho en la historia para descubrir ejemplos de fármacos biológicos que infectaron a los pacientes. Recuérdese lo que ocurrió con ciertas remesas de vacuna contra la fiebre amarilla, portadoras del virus de la leucosis aviar. Escasos años atrás, comprobóse que la hormona del crecimiento de origien humano transmitía la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, debida a la degeneración nerviosa. Y el riesgo de contaminación vírica crece con la extracción, cada vez más frecuente, de productos terapéuticos a partir de tejidos y cultivos celulares.

Las membranas de poro ultrafino puede ser exactamente lo que los laboratorios farmacéuticos necesitan para eliminar los últimos rastros de contaminación.

Los laboratorios se apoyan en el calor, la luz ultravioleta, el *p*H bajo, la irradiación y productos químicos enérgicos para suprimir la presencia, entre otros, del virus del SIDA, hepatitis B y hepatitis C. Mas, para andar seguros, nada mejor que purificar, eliminar, y volver a purificar y eliminar una y otra vez.

Por ser los virus de tamaño mayor que las proteínas, las membranas de poro fino pueden retener los contaminantes mientras fluye el producto por su interior. Las membranas alcanzan máxima eficacia cuando el tamaño del fármaco difiere bastante de la talla del contaminante. Aun en las circunstancias más favorables, no toda la proteína pasa, dice Paul J. Sekhri, jefe de producción de la membrana Viresolve desarrollada por Millipore.

El secreto de la nueva membrana, que goza ya de la oportuna patente, reside en su tamaño de poro extremadamente uniforme. Las membranas tradicionales, cuyos poros se forman cuando se evapora el solvente de un polímero, contienen inevitablemente un número excesivo de poros grandes.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

¿Cabe discernir el papel de la intuición en los escritos matemáticos, cuya lógica es impecable?

Fecha estelar: 27/9/2992. El navío espacial *Superambicioso* mantiene rumbo hacia la nebulosa del Cangrejo, tras haberse librado por los pelos de una multa por estacionamiento indebido en galaxia amarilla de carga y descarga. Su tripulación se encuentra ebria de gozo, quizás a resultas de las dieciséis cajas de jugo de Orión embarcadas en la última escala... El capitán Jonás Kink Hoces dejó sobre la mesa el estilógrafo reglamentario de la flota y frunció los labios en gesto de concentración, pensando qué más escribir.

"¡Le deseo un día lógico, mi capitán!" Pock, el primer oficial, hallábase radiante. El capitán Kink examinó sin entusiasmo aquel rostro familiar, con su nariz perruna y sus orejas vellosas. El padre de Pock era oriundo del planeta Vulgaria; era pues medio vúlgaro, o vulgar, y había quienes le concedían una fracción de vulgaridad mucho mayor.

"Me parece que he ganado nuestra apuesta", dijo Pock como quien no quiere la cosa.

"Tenga la bondad de ser más explícito, señor Pock.

–Mi capitán, sin duda recordará usted que anoche discutimos acerca de los procesos mentales de los matemáticos. Y a usted se le ocurrió hacer una apuesta.

–¡Ah! ¿Querría recordarme los detalles?

–Yo afirmaba que los matemáticos, lo mismo que los vúlgaros, proceden por lógica pura. Usted, por el contrario, hacía vagas referencias a la intuición humana, la experimentación, al razonamiento inductivo y a la generalización.

–Así es, terció Latazo, el médico de a bordo. Usted, capitán, dijo incluso que la lógica podía llevar a conclusiones erróneas. 'Unicamente los elefantes y las ballenas tienen crías de más de 100 kilogramos', nos dijo. Ahora bien, 'la masa del presidente druidiano es de 120 kilos. Ergo, la distinguida madre del presidente es una...'"

Kink consideró las consecuencias que podrían traerle sus palabras. El presidente druidiano y su madre viajaban a bordo del *Superambicioso* con pasaje diplomático y seguramente habían compartido la fiestecita.

"Por mi parte, objeté que el razonamiento por inducción serviría para demostrar que todo número impar es primo, pues 3, 5, 7, 11, 13,... lo son. El 9 es compuesto, pero por error de observación, sin duda. Usted añadió que en su opinión todos los números impares seguramente serían primos. Y de ahí nuestra apuesta: si sus juicios sobre la actividad matemática son correctos, yo habría de darle una botella de jugo de Orión, mientras que si soy yo quien tiene razón, usted dimitiría de su puesto, transfiriéndome el mando del *Superambicioso*.

–Pero ... ¡qué me dice!

–Capitán, en aquel momento de la velada, yo poseía la única botella de jugo de Orión de todo el navío.

–Eso lo explica. ¿Y pretende usted haber ganado semejante apuesta?

–En efecto, capitán. Tengo la prueba. Valiéndome del ordenador de a bordo he conseguido restaurar un antiguo manuscrito. Esta es la copia salida de la impresora."

El capitán Kink Hoces la tomó. El escrito llevaba por título *La bicicleta de Turing*.

"Sr. Pock, ¿qué es una bicicleta?

–Un medio de transporte primitivo, mi capitán." Kink asintió y leyó el texto.

"Alan Turing tenía una bicicleta, que usaba para ir a trabajar. De cuando en cuando, a la bici se le salía la cadena. Turing, persona metódica, guardaba en su despacho una botella de trementina y un trapo para limpiarse las manos al llegar. Al cabo de cierto tiempo, Turing se fijó en que la cadena parecía saltar a intervalos regulares. Se puso a contar el número de vueltas de la rueda delantera, descubriendo que la regularidad era exacta. A intervalos de exactamente n revoluciones, la cadena se desmontaba."

"¿Cuál era el valor de n? quiso saber Kink Hoces.

–El ordenador no dispone de esa información, mi capitán."

Kink prosiguió su lectura.

"Turing comenzó contando las vueltas de la rueda, pensando en efectuar alguna maniobra preventiva para que la cadena no se desmontara, pero no tardó en cansarse. Instaló entonces un contador en la rueda delantera para saber en qué momento ejecutar la maniobra. Posteriormente analizó la relación matemática entre el número r de radios de la rueda, el número e de eslabones de la cadena y el número d de dientes del plato o catalina, descubriendo que el valor de n era el mínimo común múltiplo de r, e y d, de lo cual dedujo que el desagradable acontecimiento se producía para una disposición única de la rueda, la cadena y los pedales. Al examinar la máquina comprobó que la cadena se desmontaba al producirse el contacto entre un eslabón algo deformado y uno de los radios, que estaba flojo y combado. Una vez tensado debidamente el radio, la trementina y el trapo pudieron descansar en su estante."

"¡Mi capitán! ¡Esta anécdota demuestra la potencia del razonamiento lógico!"

Una voz de fuerte acento escocés resonó en el puente.

"¡Bobadas! ¡Un mecánico medio decente hubiera descubierto la avería en unos segundos!"

El vozarrón pertenecía a Dott, el jefe de máquinas del *Superambicioso*.

"Muchas gracias, señor Dott. Y ahora, señor Pock, ¿qué relevancia tiene toda esta historieta para nuestra apuesta?

–Alan Turing era matemático, mi capitán. Este texto demuestra que los procesos lógicos utilizados eran de naturaleza lógica.

–Turing, señor Pock, era un lógico. ¡Lógicamente, resulta lógico que un lógico razone con lógica!

–Mi capitán, aunque Turing traba-

jaba en lógica matemática, él era matemático...

–¡Señor Pock, una golondrina no hace verano! Según su propio razonamiento sobre las falacias de la inducción, un ejemplo aislado no puede servir de demostración de su tesis.

–Tiene razón, capitán, reconoció el vúlgaro, abochornado. Le ruego que me disculpe. Sin duda, la faceta humana de mi linaje ha ofuscado temporalmente mi juicio."

Kink dejó escapar un resoplido ambiguo, mientras reflexionaba a toda máquina. "Podría considerar su punto de vista si tuviéramos algún medio de averiguar la forma exacta en que reflexionaba un número suficiente de los grandes matemáticos de la antigua Tierra. No tendríamos con ello una demostración lógica —Kink no se negó el placer de hacerle tomar a Pock su propia medicina—, pero aun así estaría dispuesto a admitir el resultado de un experimento controlado."

Pock dio signos de abatimiento.

"Sí, mi capitán. Pero semejante experiencia es imposible de llevar a la práctica.

– ...por razones prácticas independientes de nuestra voluntad. Por tanto, ha perdido usted la apuesta 'por defecto', como se dice en informática. Ya puede ir aflojando la botella...

–¡Capitán, capitán!"

Kink Hoces se volvió, adoptando su más noble estampa de comandante de la flota espacial.

"¿Qué sucede, señor Lulú?

–Se nos está aproximando rápidamente un objeto extraño, de 703 años luz de diámetro.

–Capitán, al parecer se trata de una cuerda cósmica, una dislocación del continuo espacio-tiempo, opinó Pock con voz calma, tranquilizadora y por ello, tanto más exasperante.

–¿Y usted, cómo lo sabe?

–Simple deducción lógica, mi capitán. Nuestro experimento es ahora realizable. Podemos servirnos de la cuerda cósmica a modo de máquina cronoespacial para visitar la Tierra en el pasado y observar de cerca a los matemáticos metidos en harina, por así decirlo."

Kink Hoces suspiró e hizo un gesto de resignación. El día no prometía nada bueno. Confeccionaron entre ambos una lista y convinieron en visitar a tres gigantes de las matemáticas: Arquímedes, Carl Friedrich Gauss e Isaac Newton.

Hace muchísimo tiempo, en una galaxia lejana, hallábase Arquímedes sentado en la arena, trazando diagramas. Había consagrado media mañana a la construcción de un hexintaterágono, buscando pertinazmente la cuadratura del círculo... Una voz leve le apartó de sus reflexiones, algo así como "Teledescenso, Dotty". Dos perfiles inseguros y deslumbrantes se materializaron en el justo centro de su magnífico polígono de sesenta y cuatro lados, dispersando la arena en todas direcciones. Arquímedes no estaba lo que se dice encantado.

Tras retocar y sintonizar las unidades de traducción, Kink y Pock pudieron hacer saber a Arquímedes que sus intenciones eran amistosas. Pock le ayudó a reconstruir su figura. Cuando le pidieron al siracusano que explicase su célebre fórmula $V = 4/3\ \pi r^3$ para el volumen de una esfera de radio r, Arquímedes, tranquilizado, les hizo saber que la había demostrado mediante una técnica complicada merced a la cual queda eliminada cada una de las posibilidades $V < 4/3\ \pi r^3$ y $V > 4/3\ \pi r^3$ aproximando la esfera por un poliedro de gran número de caras. Por lo tanto, la igualdad era la única posibilidad subsistente.

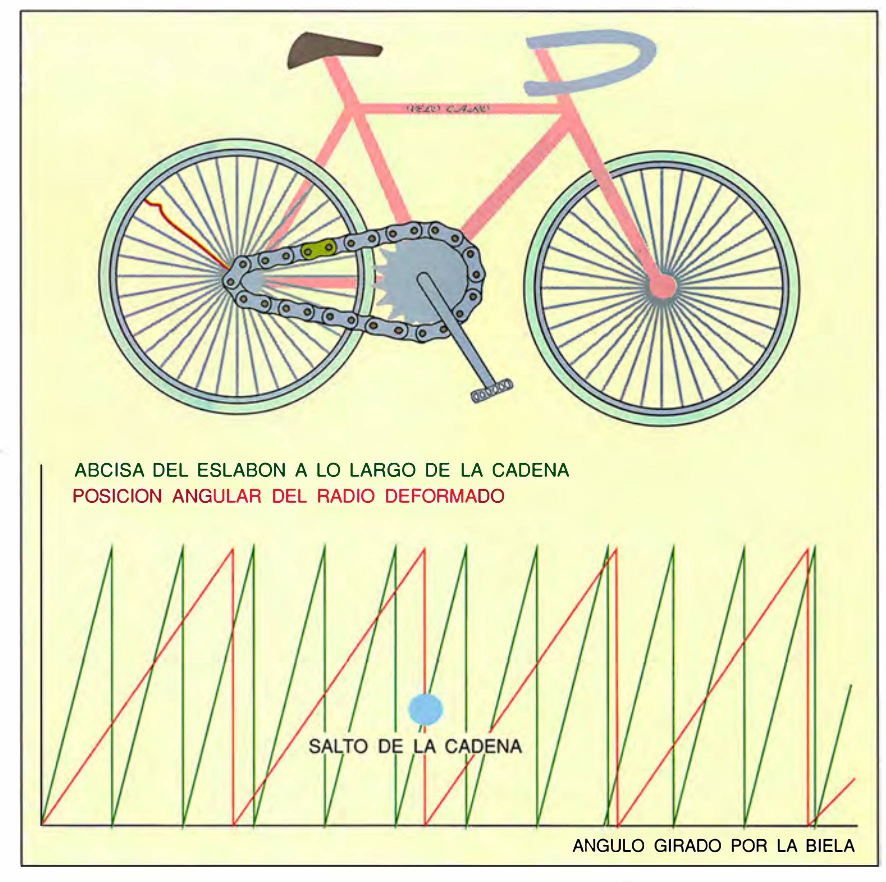
"Todo lo anterior está expuesto en mi libro *La esfera y el cilindro*", dijo Arquímedes, ufano.

"¿Se da cuenta, capitán? ¡Absolutamente lógico!"

Kink Hoces alzó los hombros mostrando indiferencia.

"No tan rápido, señor Pock. No he llegado a comandante de la flota estelar a base de dar las cosas por hechas. Para empezar, toda esta demostración por exhaustación contiene un elemento de falacia. Tenemos, en primer lugar, una presunción tácita, a saber, la existencia de áreas y volúmenes limitados por superficies curvas."

El espectro de radiación de Arquímedes, picado, se desplazó del infrarrojo al rojo vivo. "¡La verdad, señor Pock, me sorprende que no haya usted reparado en ello!", le reprochó Kink Hoces. La nariz de Pock viró hacia el azul, equivalente vúlgaro del sonrojo. Sin duda a causa de sus antepasados terrícolas. "Pero incluso aceptando la existencia del volumen, el método de exhaustación no funciona más que conociendo de antemano la solución. No podemos decidir qué desigualdades hay que



1. *El eslabón defectuoso de la cadena* (en verde), *al pasar sobre la protuberancia de uno de los radios de la rueda trasera* (en rojo), *desmonta la cadena. Si representamos la abscisa del eslabón a lo largo de la cadena y la posición angular del radio en función del ángulo de la biela del pedal, vemos que el eslabón pasa sobre la parte alta del radio para un cierto ángulo de la biela.*

eliminar sino sabiendo la igualdad a demostrar." Kink se volvió hacia Arquímedes.

"¿Por qué razón se decidió por el valor 4/3 πr^3? ¿Probando a ver si acertaba?

–¡De ninguna manera!, exclamó el sabio indignado. He explicado la obtención de la fórmula en mi *Método*. (Este tratado de Arquímedes, que estuvo perdido muchos siglos, fue descubierto en Constantinopla por el erudito danés J. L. Heiberg, en 1906. Arquímedes revela allí el origen de sus ideas.) Digo en él que 'ciertos teoremas me parecieron claros desde el primer momento, merced a métodos mecánicos. No obstante, era preciso después probarlos geométricamente, porque el método mecánico no constituye una verdadera demostración. Ahora, es evidente que resulta tanto más fácil hallar demostraciones genuinas cuanto más se sabe de la cuestión.'"

A continuación, Arquímedes les mostró su método, que se fundaba en la descomposición de los sólidos en rebanadas infinitamente finas y suspender luego las rebanadas de los brazos de una balanza.

El programa de navegación les arrastró súbitamente de allí, propulsándoles hacia Gauss. Mientras el capitán Kink Hoces sonreía beatíficamente, Pock parecía un tanto alicaído. Persuadieron al gran matemático alemán para que les demostrase uno de los teoremas de los que más se ufanaba, la pieza esencial de su tesis doctoral, a saber, que toda ecuación polinómica: $p(z) = z^m + a_1 z^{m-1} + ... + a_{m-1}z + a_m = 0$ posee al menos una solución en el sistema de los números complejos.

"Explíquenos su demostración, rogó Pock.

–Con mucho gusto, respondióle Gauss. Escribamos $z = x + iy = re^{i\phi}$, donde $i^2 = -1$. El valor de $p(z)$ será un número complejo, que denotaremos $t + iu$. Si este valor nunca fuese igual a cero (cualquiera que sea el valor de z), la función $g(r, \phi)/(t^2 + u^2)^2$ sería continua y diferenciable por doquier siempre que lo fuera g. En tal caso, la integral

$$\iint_K g(r,\varphi)/(t^2+u^2)^2\, dr\, d\varphi,$$

puede ser calculada de dos formas, que han de dar el mismo valor. Sin embargo, yo sé construir una función g para la cual las dos evaluaciones son explícitamente realizables y dan resultados diferentes..."

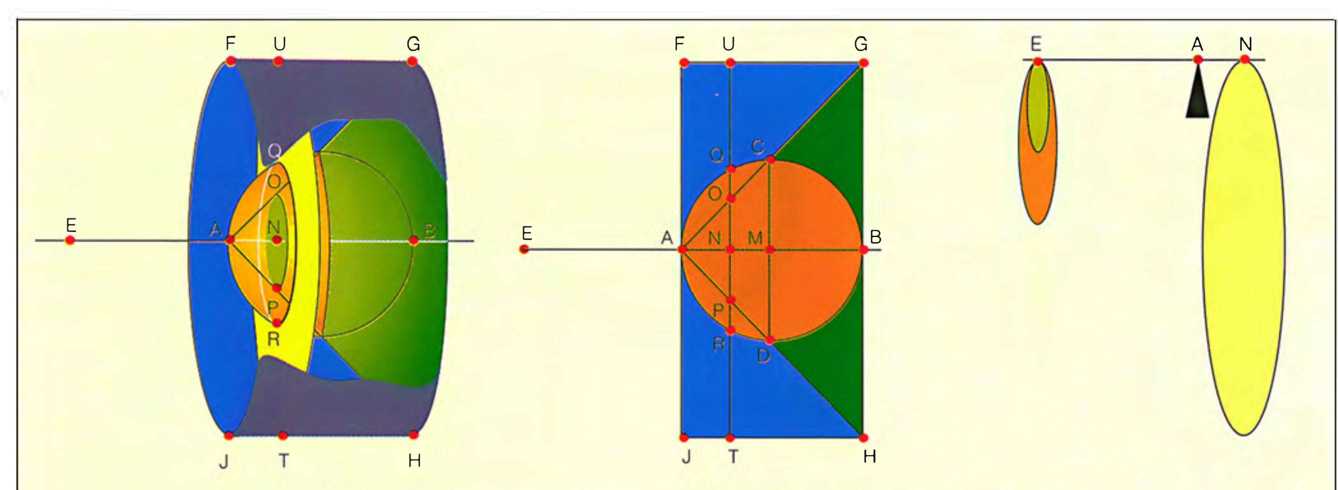
Gauss escribió entonces varias páginas de cálculos, concluyendo con aire triunfal:

"¡De esta forma, la hipótesis según la cual el polinomio no se anulaba es falsa y el teorema está demostrado por reducción al absurdo!

–¿Existe algo más lógico que una demostración por reducción al absurdo?, preguntó retóricamente Pock. ¡Fantástico! ¡Explíqueme, por favor, ese paso de la derivada segunda...

–Carl Friedrich —me permite que le llame así, ¿verdad?— dijo Kink, pasando afectuosamente el brazo por los hombros del matemático, cuénteme, por favor, cómo pudo llegar a descubrir una demostración tan complicada.

–Verá, dijo Gauss, empecé a pensar en el número de vueltas que da una curva cerrada en torno al origen del plano, un número entero que ustedes denominan índice topológico. Se me ocurrió que si z describía un circulito muy pequeño en torno al origen O, su imagen $p(z) = t + iu$ apenas se apartaría del punto correspondiente al término independiente; no lo bastante, desde luego, para que la gráfica de $p(z)$ llegase a rodear al origen, por lo que su índice respecto a él sería 0. En cambio, si z describiera un círculo muy grande centrado en O, el término dominante de $p(z)$ sería z^m y los valores de $p(z)$ se desviarían relativamente poco respecto de él. Como z^m es de la



EL METODO DE ARQUIMEDES PARA HALLAR EL VOLUMEN DE LA ESFERA

Notaciones: C(XY) es un círculo de radio XY
S(XY) es un cuadrado de lado XY
R(XY, VW) es un rectángulo de lados XY, VW.
Entonces, S(ON) + S(NQ) = S(AN) + S(NQ)
= S(AQ) por el teorema de Pitágoras
= R(AN,AB) por teoremas clásicos sobre círculos
= R(ON,NU).
Así pues,

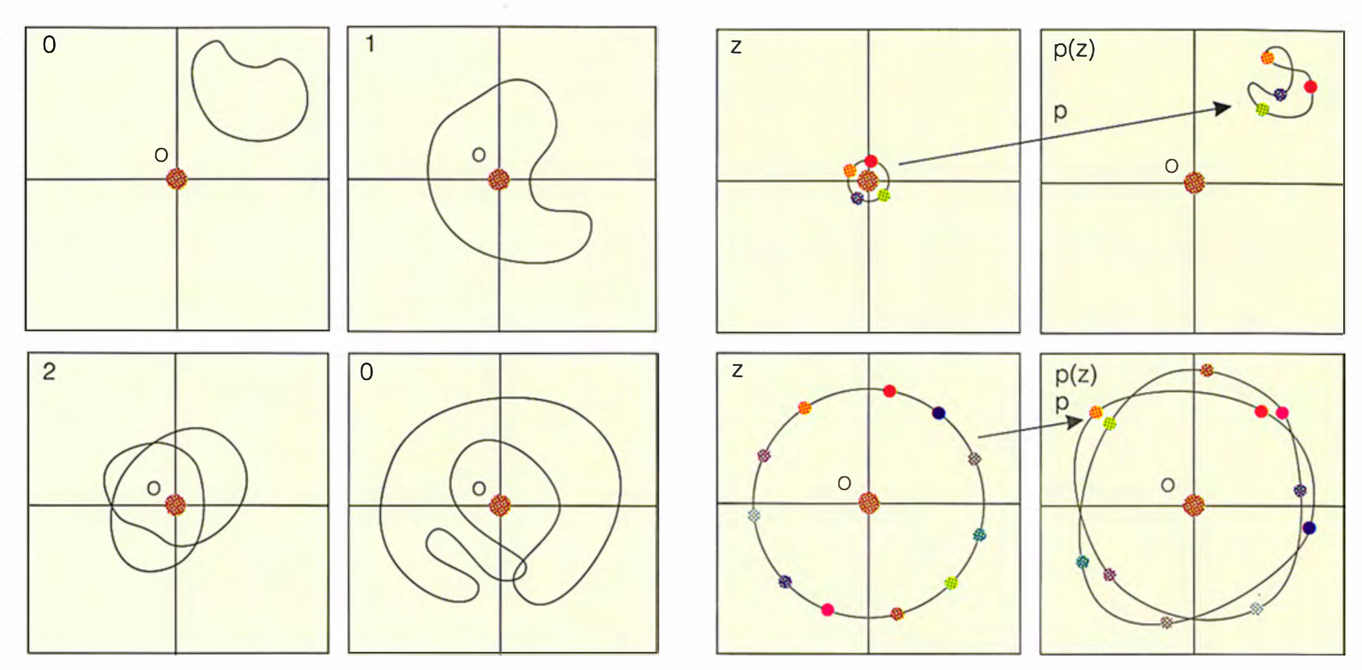
$$\frac{S(ON) + S(NQ)}{S(NU)} = \frac{R(ON,NU)}{S(NU)} = \frac{ON}{NU}$$

$$\frac{C(ON) + C(NQ)}{C(NU)} = \frac{ON}{NU} \quad (*)$$

dado que las áreas de los círculos son proporcionales a los cuadrados de sus diámetros.
Supongamos que la esfera, el cilindro y el cono tengan la misma densidad, con lo que sus masas serán proporcionales a sus volúmenes. Imaginemos que AB es el eje de una palanca cuyo fulcro está en A y sea E un punto situado a la distancia AB, pero a la izquierda.
Dejemos la sección transversal C(NU) del cilindro; suspendamos C(ON) y C(NQ) de E. La ecuación (*) afirma que hay equilibrio. Hagamos ahora otro tanto para todas las posiciones de N: transferimos a E el cono entero AHG y la esfera entera ARDBCQ, mientras que el cilindro JHGF permanece en su lugar; el equilibrio se conserva. Ahora bien, el centro de masa del cilindro se encuentra en M por su simetría y por ello los volúmenes cumplen la ecuación:

cono + esfera = 1/2 cilindro

El volumen del cilindro es $8\pi r^3$, mientras que el del cono es una tercera parte de él, o sea, $8/3\,\pi r^3$. Por tanto, el volumen de la esfera es la diferencia, que es $4/3\,\pi r^3$, como se pedía.



2. El índice topológico de una curva cerrada con respecto al origen expresa cuántas veces rodea al origen la gráfica de tal curva.

3. Si z describe un círculo diminuto, p(z) *describirá un bucle de poco tamaño, cuyo índice respecto al origen en O es cero.*

forma $r^m e^{im\phi}$, cuando ϕ varía desde 0 hasta 2π, el ángulo del punto que representa a $p(z)$ giraría $2\pi m$. Por tanto, el número de vueltas de $p(z)$ en torno al origen sería m, que es distinto de 0.

De esta forma, cuando el radio de un círculo centrado en O vaya creciendo desde el pequeño al grande, para ciertos valores del radio el número de vueltas en torno a O de la curva descrita por $p(z)$ ha de cambiar. Ahora bien, como la propia curva se va deformando continuamente, resulta bastante obvio que, para conseguir el cambio de índice, no hay más remedio que hacer pasar la curva por el origen. Pero entonces, para algún valor z de este círculo singular se verificará que $p(z) = 0$, como queríamos demostrar.

–Ya veo, asintió Kink Hoces.

–Pero como no pude demostrar el teorema de esta forma, estuve trabajando con él hasta convertir la idea del número de vueltas en la de la integral doble que antes expuse.

–Si lo he entendido bien, la idea inicial de la demostración partía de métodos intuitivos e ilógicos y después, a posteriori, usted confeccionó la formulación lógica.

–Al concluir un elegante edificio, manifestó Gauss en tono altivo, el andamiaje no debe ser visible."

La sonrisa de Kink se hizo tan amplia que casi se le caen las orejas en la boca.

"Carl Friedrich, ¿sabe lo que dijo de usted Niels Henrik Abel, uno de sus sucesores y admiradores más afamados de todos los tiempos?

–Pues no. ¿Qué dijo?

–'Gauss es como el zorro, que borra con la cola las huellas que va dejando en la arena.'

–¡Me siento muy halagado!"

Arribaron justo sobre el gabinete de trabajo de Isaac Newton, quien se encontraba en cuclillas con una sierra en la mano. En el zócalo de la puerta había un recorte de unos 30 centímetros de ancho, antiguo ya según todos los indicios, pues estaba pulcramente enmarcado en madera barnizada. Cerca de esta primera apertura había otras dos, rodeadas de aserrín; Newton trabajaba en una tercera. Pock, siempre curioso por el comportamiento de los humanos, le preguntó a Newton para qué servía el agujero grande.

4. La única forma de que varíe el índice respecto al origen de una curva que se deforma continuamente es hacerla pasar por él.

"¡Ah, gentil señor, que descendéis del celeste firmamento! Es una vía para mi gata. Le place entrar y salir a capricho de mi gabinete y tórnaseme fastidioso tener sin cesar que estar abriendo y cerrando la puerta.

–A la que nosotros llamamos gatera, observó Kink Hoces. Estoy impresionado por vuestra capacidad de invención. No obstante, prefiero vuestro cálculo diferencial a la gatera. Quisiéramos preguntaros cómo se os ocurrió la idea.

–A mi modo de ver, respondió Newton, el cálculo diferencial no es apenas sino un juguete fútil. En cambio, abrir un recorte en esta madera sin astillar la tabla, eso sí que es una hazaña, podéis creerme. Pussy quedará agradecida, o por lo menos, silenciosa. Ahora, si tienen la amabilidad de disculparme....

–Sir Isaac, no quisiéramos importunaros, pero hay una cosa que me tiene intrigado", dijo Pock.

Newton suspiró con hastío y dejó la sierra en el suelo.

"¿Por qué estáis haciendo agujeros más pequeños?

–¿Cómo?, se asombró Newton. ¿No es perfectamente obvio? ¡Pussy ha tenido gatitos!"

Pock había ganado. Se quedó mirando a Kink Hoces. El ya ex-capitán le devolvió la mirada, con gesto sombrío y meneó la cabeza en signo afirmativo.

Libros

Antonio F. Rañada, Ramón Margalef y Luis Alonso

Matemática aplicada

Métodos numéricos

MATHEMATICAL ANALYSIS AND NUMERICAL METHODS FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, por Robert Dautray y Jacques-Louis Lions. Springer Verlag; Berlín, 1990.

Los métodos numéricos han llegado en pocos años a ser una herramienta cotidiana para la gran mayoría de los científicos, lo que obliga a replantear los contenidos y el enfoque de los programas de las matemáticas aplicadas. En efecto, no se enseña de la misma manera, o mejor dicho no debería enseñarse, a quienes van a utilizar tan sólo métodos analíticos que a quienes van a verse obligados a buscar soluciones numéricas de los problemas, lo que incluye a la gran mayoría de físicos, ingenieros, químicos o matemáticos.

Este libro es el cuarto volumen de un curso de análisis matemático escrito con ese espíritu. En contra de lo que podría deducirse de su título, no es un tratado sobre métodos numéricos, sino una presentación de las matemáticas especialmente dirigida al planteamiento riguroso de las soluciones numéricas. Es de interés para los especialistas en tales métodos, sobre todo para los más matemáticos y para los físicos, ingenieros o similares que tengan que enfrentarse a cuestiones difíciles para las que no basten los clásicos repertorios de programas ya preparados.

Se trata de una obra monumental en seis tomos. El primero de ellos trata de problemas físicos, fluidos y la ecuación de Navier-Stokes, elasticidad, ecuaciones de Maxwell, fenómenos de transporte y física cuántica, y de una primera aproximación a su modelización matemática, con una segunda parte dedicada al operador de Laplace. El segundo se dedica a transformaciones matemáticas, con un capítulo sobre la rápida de Fourier y a operadores diferenciales lineales. El tercero se ocupa de la teoría espectral que se aplica luego al electromagnetismo y a la física cuántica. En el cuarto, que es el que comento más en concreto, se estudian los problemas mixtos, aquellos que son elípticos o hiperbólicos según la región espacial, las ecuaciones integrales y el método de los elementos finitos cuyo fundamento matemático se trata con gran detalle y rigor. Los volúmenes quinto y sexto se dedican a problemas de evolución, tomando como modelos de partida las ecuaciones de la difusión, de ondas, de Schrödinger o de Navier-Stokes.

En resumen, una obra monumental (veintiún capítulos y más de dos mil páginas) de gran calidad y nivel que interesa a quienes necesitan una presentación de las matemáticas de la física adecuada para el uso frecuente de los métodos numéricos o simplemente quienes desean una obra completa escrita en el espíritu de la generación que ya usa a diario el ordenador para resolver problemas cuantitativos. (A. F.-R.)

Ecología

La lección del escarabajo

DUNG BEETLE ECOLOGY. Edición preparada por Ilkka Hanski e Yves Cambefort. Princeton University Press; Princeton, 1991.

Los escarabajos que se alimentan de excrementos frescos, los llamados coprófagos y, entre ellos, los peloteros, han atraído frecuentemente la atención del observador profano y, mucho más, la del naturalista. Jean Henri Fabre les dedica páginas inolvidables. Inspiraron también a los antiguos egipcios que veían y veneraban en el escarabajo sagrado, *Scarabaeus sacer*, un símbolo del retorno y un anticipo de la resurrección. Para el ecólogo tienen otro valor simbólico, pues la relación de peso entre el cuerpo de los peloteros y el de la bola que hacen rodar (entre 1/6 y 1/79, según las especies, pero con muchos valores concentrados alrededor de 1/15) se convierte fácilmente en indicativo de la relación ponderal entre la biomasa y la necromasa en la biosfera entera y un símbolo de cómo la biosfera hace circular la materia orgánica muerta.

Este libro reúne en 20 capítulos otros tantos ensayos preparados por una serie de distinguidos investigadores de estos insectos y, por supuesto, va más allá de las simples historias del escarabajo y de su bola, entre otras razones porque la mayoría de los coleópteros que manejan el estiércol lo hacen de manera directa. Son una fracción relativamente menor los que construyen galerías verticales que alcanzan hasta más de dos metros de profundidad, debajo o cabe los excrementos, o bien amasan bolas que hacen rodar y éstos son, en general, los más corpulentos. Estas distintas actividades o aficiones tienen expresión taxonómica: los *Aphodiidae* (unas 1850 especies, de las que el 90 % se clasifican en el género *Aphodius*) no suelen rebasar los 10 mm, son abundantes en países templados y fríos y ascienden hasta la alta montaña (alcanzando hasta los 5200 m de altura en el Tíbet; es satisfactorio encontrar referencias a nuestra Sierra Nevada en este libro) y utilizan directamente los excrementos; los *Geotrupidae*, con unas 150 especies, suelen medir entre 20 y 30 mm y construyen frecuentemente túneles y galerías y los verdaderos peloteros se incluyen entre los *Scarabaeidae*, aunque muchos de los representantes de esta familia construyen galerías. Se han descrito unas 5000 especies de *Scarabaeidae*, más numerosas en los países cálidos y algunas de ellas son muy corpulentas (hasta 5 cm).

El libro parece adecuado como fuente de varia información, pero posiblemente no es tan importante en su preocupación por colocar lo que sabe acerca de los coleópteros coprófagos dentro de una teoría ecológica actual, que siempre será provisional. La presente obra es un buen complemento eficaz de otro libro, de Gonzalo Halffter y W. D. Edmonds (1982), *The nesting behavior of dung beetles (Scarabaeidae): An ecological and evolutive approach* (Instituto de Ecología, México).

La ecología suele imaginar cadenas tróficas lineales y "limpias", pero todos los ecólogos son cons-



Modelado de una pelota por un escarabajo de la especie Kheper platynotus.

cientes de que alrededor de la boca de los animales, en las porciones abandonadas de presas, en el tubo digestivo y en los excrementos, existen multitud de heterótrofos, principalmente bacterias, que transforman incesantemente los materiales muertos, que siguen actuando en el funcionamiento y estructuración de los ecosistemas. Entre los insectos coprófagos no sólo hay coleópteros, sino también muchos dípteros y, por supuesto, coleópteros de otras familias, que compiten con ellos.

El paso de la saprofagia a la coprofagia significa reducir el tiempo que se puede perder dejando que la materia orgánica de los excrementos se descomponga a su aire. De esta forma se aprovecha al máximo el recurso. Los rumiantes que trabajan un material celulósico con la ayuda de muchas bacterias y dan un estiércol relativamente voluminoso han sido los más apropiados para estimular la evolución de los coprófagos. A veces, éstos continúan dentro de su cuerpo la fermentación por medio de bacterias anaerobias, tal como vienen del tubo digestivo de los mamíferos, y eso ocurre en las larvas de muchos de nuestros coleópteros. Otras especies y, en la mayoría de los casos, los adultos pueden cambiar algo el estilo de la fermentación, favoreciendo una mayor participación de gérmenes aerobios. Quizás exista una relación entre el tamaño de los coprófagos y el de los animales que producen las masas de excrementos. El mayor coprófago (*Mnematium cancer*) se relacionaría más o menos estrictamente con las masas de estiércol de los elefantes. La presión evolutiva que responde a una mayor demanda de nitrógeno puede conducir a usar algunas clases menos frecuentes de excremento, hasta llegar a la necrofagia (consumo de cadáveres). Es notable el poder de atracción extraordinario que tienen los excrementos humanos sobre muchas de las especies coprófagas.

La calidad del alimento y la forma de tomarlo corresponden a adaptaciones singulares de las piezas bucales, aptas con frecuencia a manipular material de fluidez considerable. El carácter poco nutritivo del alimento, y la dosificación del que reciben las larvas, obvia en la formación de pelotas o de otras despensas con un huevo único, o bien con un número limitado de ellos, hace que, a diferencia de otros insectos, los adultos deban seguir comiendo del mismo maná durante cierto tiempo, antes de ser capaces de reproducirse. Algunas especies tienen una vida extraordinariamente prolongada en su estado adulto (hasta dos años) y construyen sucesivamente muchas tortas o pelotas, dejando frecuentemente un solo huevo en cada una de las raciones.

Hace unos 250 millones de años que estos insectos ruedan sobre el mundo, aunque no se sabe de seguro si ya iban tras el estiércol de los dinosaurios; en realidad hay muy pocas especies actuales que sean atraídas por los excrementos de los reptiles. Pero las posibilidades son muchas: *Zonocopris* va asociado a —es transportado por— grandes caracoles terrestres y presumiblemente usa sus excrementos. Otras especies parece que son capaces de utilizar residuos de hormigueros, y aun algunas se sitúan entre el pelaje de las proximidades del ano de diversos mamíferos.

Hay especies parásitas o cleptoparásitas que no manejan ni transportan estiércol, sino que tratan de utilizar parte de las reservas dispuestas por otras especies. Dentro de una especie la iniciativa puede partir de uno u otro sexo, del macho, por ejemplo, en los *Scarabaeus* y de la hembra en *Sysiphus*; la pelota puede actuar como estímulo sexual para el otro miembro de la pareja. No faltan intentos de robarse las bolas, y, después del combate que, en su caso,

ocurre, puede producirse alguna señal táctil de reconocimiento en la pareja. Entre los constructores de túneles, la iniciativa es de la hembra, y luego pone un huevo en cada uno de los segmentos de la masa que se alarga y divide a modo de salchicha. La cópula se verifica en el lugar donde se ha reunido el alimento y después de enterrarlo.

Se conoce bastante bien la distribución actual de las especies y las afinidades faunísticas. Presumiblemente el número de especies aumenta hacia los trópicos: de Finlandia (19) a Costa de Marfil (150). España ocupa un buen lugar y se intercala un estudio del Languedoc, que resulta muy interesante para nosotros (por J. P. Lumaret y A. A. Kirk). Hay notables diferencias geográfico-históricas. El hombre sin duda ha sido un factor importante en la dispersión de muchas especies. En Norteamérica se encuentran numerosas especies de coprófagos procedentes de Europa. Puesto que la fauna autóctona australiana consistía en especies adaptadas al estiércol de marsupiales, se tuvo interés en promover la introducción de especies aptas para regular la cantidad de estiércol de los animales domésticos; sin los coleópteros coprófagos adecuados, creíase que podía persistir demasiado o que podía dar origen a una cantidad excesiva de moscas. Por lo menos una veintena de especies se introdujeron con éxito. En el Sahel el deseo de fijar las poblaciones nómadas y sus rebaños ha conducido a cambios indudables en la fauna de coprófagos. Los países tropicales ofrecen una gran diversificación de recursos, desde los excrementos de los pequeños antílopes hasta las ingentes tortas de los elefantes.

El tema de la coexistencia de diversas especies y de la diversidad de la fauna de coprófagos se comenta en relación con los procesos de competencia y con los posibles mecanismos de segregación ecológica. Es posible que las especies corpulentas entren en una suerte de lotería y sean las primeras en llegar; otras especies vendrían después y utilizarían material más viejo y más seco. Especies asociadas pueden ser de talla diversa, se indica que sus relaciones de tamaño, expresadas por su longitud, podrían quedar alrededor de 1,38:1, relación que estadísticamente no resulta convincente.

El libro concluye con varios apéndices que reúnen más información, principalmente cuantitativa, y una excelente bibliografía. Obras como la que comentamos, al presentar reunida la nueva información acumulada al paso de los años, ayudan a reconsiderar algunos de los temas biológicos de siempre, de manera mucho más matizada y razonada, aunque no por ello menos fascinante. (R. M.)

Epidemiología

Naturaleza e historia

A Short Course in Epidemiology, por Staffan E. Norell. Raven Press; Nueva York, 1992.

Epidemics and Ideas. Essays on the Historical Perception of Pestilence. Dirigido por Terence Ranger y Paul Slack. Cambridge Univesity Press; Cambridge, 1992.

The Malaria Capers, por Robert S. Desowitz. W. W. Norton and Company; Nueva York, 1991.

History of Aids. History and Origin of a Modern Pandemic, por Mirko D. Grmek. Princeton University Press; Princeton, 1990.

No se le impuso a Hércules el trabajo de conjurar las epidemias. Quizá porque el héroe mítico hubiera fallado, como ha fracasado su heredero actual, el hombre de ciencia. Cierto es que éste ha logrado erradicar algunas, pero a modo de hidra decapitada surgen otras cabezas no menos siniestras: al domeñamiento general de la viruela ha seguido la expansión mundial del sida. De la naturaleza y contenido de la epidemiología, de las pautas comunes de comportamiento ante las epidemias y de dos formas de éstas (el paludismo y el sida) tratan los libros que, en mi opinión, merecen hoy considerarse a propósito de esa suerte de maldición cainita.

A short course in epidemiology consta de casi un doble centenar de páginas, la segunda mitad de las cuales son complementarias o apendiculares. Quiere ello decir que el libro solventa su contenido doctrinal en una centena escasa de planas. No va más allá de las nociones introductorias que suelen recibir los alumnos de las facultades de medicina en las clases de bioestadística. Norell, que trabaja en el Instituto Carolino de Estocolmo, ha escrito efectivamente un manual sencillo sobre los conceptos fundamentales de la disciplina y su exudación a partir del estudio de ejemplos o problemas, cuya resolución aporta luego.

Llámase epidemiología, define, el estudio de la incidencia de una enfermedad y comprende, remacha, el estudio de las asociaciones entre la enfermedad y las características de los individuos y el medio en que se desenvuelven. Se propone investigar de qué forma esas características condicionan el riesgo de contraer una enfermedad determinada. Por prevalencia se entiende la proporción de individuos que padecen el mal en un momento dado. Denomínanse efectos cofundadores los que ligan la exposición a la enfermedad y esta última.

Ese manojo de conceptos preliminares se completa con la descripción de la base del trabajo y el diseño del estudio epidemiológico a emprender. En la base del trabajo se toma una muestra o segmento de población, la sometida a examen, y se la pone en relación con el brote de la enfermedad durante un intervalo temporal definido. Por su lado, el proyecto o diseño del estudio se propone conseguir resultados que reflejen la realidad con unos recursos limitados, evitando los errores sistemáticos y, en lo posible, los aleatorios; de donde la importancia del seguimiento, otro capítulo nuclear de esta obra.

En la explicación del nacimiento de la filosofía en las costas jónicas, hace veintiséis siglos, se les suele hurtar a los alumnos el ejemplo más claro de racionalización, el de la medicina a través del relato que Tucídides trenza sobre la peste en el libro segundo de la *Historia de la guerra del Peloponeso*. James Longrig acierta en la hermenéutica de ese flagelo y apuntala así lo que debiera ser una visión histórica de los conceptos biomédicos en la antigüedad clásica. Aparece su comentario en *Epidemics and ideas*, actas de un simposio del mismo título celebrado en 1989.

En la introducción general a esa obra, Paul Slack resume las notas distintivas y comunes de las epidemias allí analizadas. No se trata tanto de un cuadro semiológico o etiológico cuanto de la "percepción" social del brote en cuestión. Porque el propósito de la reunión se inscribe en lo que hoy se denomina historia social de la medicina, disciplina donde convergen instituciones políticas, derecho, filosofía, religión, etnografía y, cómo no, "ecología", amén de las componentes: historia, sociología y medicina. Demasiadas cuerdas, quizá, para un violín stradivárico.

Para evitar cacofonías o relaciones tomadas por los pelos, desliz habitual en ese campo hoy de moda (en



Europa vivió durante siglos aterrorizada por la peste, la "muerte negra", aquí representada en la iglesia del Gonfalone, de Perugia.

dispares zonas de la ciencia: historia social de la química, historia social de la biología, etcétera), los autores se han ceñido a distintos casos de oleadas que dejaron su sello en la trayectoria de la humanidad. Todas las culturas, en efecto, acusan un mismo efecto de choque, no obstante la peculiaridad de la epidemia o su agente causal: terror al contagio, huida a otros lugares libres de miasmas y búsqueda de un chivo expiatorio (emigrantes, suburbios míseros, judíos o frailes), entre otros factores.

La memoria histórica de unas epidemias condiciona la respuesta a las nuevas o a los rebrotes de las familiares. En ese aspecto, las medidas gubernamentales se van repitiendo de un tiempo a otro, mediante cuarentenas, lazaretos y normas preventivas de carácter educativo e higiénico, sobre todo. Medidas que han de compaginarse con la cosmovisión de cada pueblo; el fatalismo árabe, por ejemplo, ha visto en esa mortandad general un crisol para el martirio o una gracia del cielo, en tanto que los cristianos, propensos a considerarla fruto del pecado o de un comportamiento desordenado, no se inhibieron y buscaron métodos racionales para su erradicación a través de la identificación de su origen.

Resulta ingeniosa, y verosímil, la interpretación que da Peregrine Horden de las luchas entre dragones y santos en la alta Edad Media, en particular en el París merovingio de mediados del siglo V. Frente al simbolismo habitual, de carácter moralizante (la bestia es el diablo y el santo la victoria del bien), Horden, sin negar ese enfoque, concede carácter realista a la iconografía y la escenografía implicadas: el dragón pestífero que habita, por lo común, en ciénagas y terrenos pantanosos ahuyenta a los habitantes al contaminar el aire con su aliento y provocar la epidemia (fiebres palúdicas); su conjura termina con el exterminio del reptil (drenaje de los suelos y viabilidad de los asentamientos). A la visión cristiana altomedieval sigue, firmada por Lawrence I. Conrad, la musulmana de los siglos VIII y IX, cuando las enseñanzas de Mahoma reciben una mayor estructuración que influye en el tránsito de la óptica árabe preislámica a la islámica. Preislámica era la noción de contagio en la propagación de la peste, entendida ésta ahora por los mahometanos como un acto divino directo y libre de cualquier sujeción aleatoria del contagio.

La relación entre peste y pobreza, desde finales del siglo XV hasta mediados del XVII, constituye el objeto de la contribución de Brian Pullan, que se ha documentado en fuentes primarias y secundarias, decretos legislativos, crónicas, cartas e informes de testigos presenciales. La peste no ha perdido, a los ojos de los italianos de esos años, su condición de flagelo divino, pero posee ya unas causas naturales perfiladas: escasez de sal, hambruna, hacinamiento, corrupción de las aguas y del aire (miasmas). El medio de propagación es el contagio; el vehículo principal, los vagabundos que pululan por doquier, seguidos de emigrantes (marranos, judíos, albaneses o eslavos), soldados y burdeles. Para atajarla se acometen obras y dictan leyes que se proponen aplacar la ira de Dios (iglesias votivas, enderezamiento de las costumbres) y resolver el problema de la indigencia (fundaciones, hospitales de pobres). Crece un doble sentimiento de solidaridad con la legión mendicante y de temor y odio hacia la misma. La estabilidad social se cuartea cuando las ciudades sometidas a cuarentena quedan convertidas en ciudades asediadas, sin suministros, y surgen revueltas de quienes no tienen nada que perder y se apoderan de las casas vacías y bienes dejados por los muertos. Aparecen nuevos ricos, que amasan su fortuna con la desesperación de la enfermedad (médicos, empleados, enterradores). De las cenizas de la peste emerge una nueva sociedad: menos pobres, mermado su número en guadaña selectiva, y nuevas familias poderosas, justamente asociadas a las aves de rapiña.

La incardinación de la asistencia sanitaria en los problemas de la sociedad, más que del estado o del monarca, arriba con el advenimiento de la medicina moderna. La noción de enfermedad, anticontagionismo dominante en las postrimerías del XVII y principios del XVIII, configura la idea de hospital y la misión investigadora de éste en las Islas Británicas, en un período que coincide con la revolución industrial (enfermedades laborales), la formación de masas proletarias (higiene pública) y la creación de centros especializados (hospitales de infecciosos). De ese mundo nuevo trata John V. Pickstone.

La epidemia, relacionada siempre con el hacinamiento, la pobreza y el hambre, se ha visto implicada, en particular los cinco brotes pandémicos de cólera del siglo pasado, con las revueltas y los amotinamientos. Richard J. Evans llega, mediante el análisis de distintas situaciones europeas, a la conclusión según la cual el cólera fue causa, y no efecto, de las revoluciones. Su base de apoyo es el carácter anticipador de la epidemia sobre la eclosión de la revuelta, una ligazón algo tenue si se tiene en cuenta los motivos múltiples de toda convulsión social. Y pasando de los grupos marginados a zonas enteras de postramiento, encontramos el último tercio de la obra consagrado a la respuesta que distintas epidemias reciben en las poblaciones ame-

rindias, Oriente y Africa; para concluir con un estudio sobre el sida en Inglaterra.

La visión del historiador en ese último tercio de *Epidemics and ideas* se completa con la del microbiólogo y experto en epidemiología en *The malaria capers*. La narración cambia ahora de registro, aunque no merma el interés, en las dos partes que integran la obra: el "kala azar" y la malaria. Desowitz ha demostrado ya su pericia en el género con otros libros, donde, igual que aquí, une la habilidad expositiva con la profundidad del conocimiento de los ciclos vitales de los vectores, los recovecos de la inmunidad y la bioquímica de la infección.

Le gusta partir de un caso real, en la primera parte la madre campesina de la llanura gangética que recorre distintas instancias de la asistencia sanitaria de la India con su hija en brazos para que le curen una fiebre persistente; ante la imposibilidad de pagar el medicamento, la pequeña muere. La anécdota le da pie para trazar un cuadro vivo de la medicina en ese subcontinente y la miseria que padecen sus habitantes.

A lo largo de los capítulos siguientes irá salpicando el aspecto humano de la investigación y la terapéutica con el avance lento de la identificación del díptero portador (*Phlebotomus argentipes*) del protozoo parasitario (*Leishmania donovani*), causante éste de kala azar, epidemia que provoca centenares de víctimas en los países bañados por el Ganges. Reserva las precisiones técnicas para las notas, sumarias y esclarecedoras, donde el crítico sospecha la pluma de un cuidadoso redactor editorial de la Norton.

A pesar de los esfuerzos, y relativos éxitos, de algunas campañas (DDT, fármacos antimoniales), no existe todavía ningún medio, ni biológico ni químico, que permita erradicar la epidemia. El autor culpa del fracaso a los vaivenes políticos y a la dejadez de las autoridades sanitarias que no han sabido mostrarse constantes en la investigación para atajar la plaga ni buenos administradores de los recursos empleados por la OMS y la ayuda exterior. Pone, por último, una nota de ingenio cuando sugiere, y razona, que la extinción de los dinosaurios debióse a un brote de kala azar. *Se non è vero è bene trovato*, y al menos el lector conocerá el sistema inmunitario de los reptiles y la acción de sus macrófagos contra los parásitos.

La segunda parte, sobre la malaria, repite el patrón que le ha servido de guía para tejer la primera. Arranca de otro ejemplo real, en el que muere la madre encinta, víctima fácil del *Plasmodium falciparum*, transmitido por picadura de mosquito. De malaria mueren al año dos millones y medio de personas. Pero la infección, en sus distintas formas y especies de *Plasmodium* causantes, apenas si perdona ningún grupo vertebrado.

Cuando en capítulos posteriores recuerda la investigación más o menos reciente de los distintos medios para atajarla y resalta la labor de los centros, americanos e italianos (con los que él se halla relacionado), evidencia cierto sesgo unilateral que suele ser habitual en los científicos judíos. No de otro modo hemos de entender el silencio sobre la labor de Patarroyo.

La raza del historiador se acrisola en la independencia de juicio y en la variedad de los temas y tiempos abordados con soltura. Grmek posee, además, valentía, pues no otra cualidad necesita un experto en la patología del pasado para "jugársela" con una epidemia del presente en plena efervescencia. Su obra sobre el sida, donde debe hablar de personas e instituciones hoy actuantes, y enjuiciar en prieta perspectiva su intervención, denuncia, además, el pecado de omisión de quienes, entre nosotros, no se han atrevido a sacar a la luz los pasos del síndrome tóxico o el curso más inmediato del desarrollo en España del síndrome de inmunodeficiencia adquirida. Basta hojear las páginas de *History of AIDS*, reeditada en su edición francesa original y ahora en versión americana, para avergonzarse de la penuria hispana en este campo de la investigación virológica y epidemiológica a lo largo de los diez últimos años.

Grmek se propone ligar la realidad de una epidemia nueva con el desarrollo de las ideas surgidas en torno a la misma. Se vale del mismo método que empleó para su famoso tratado sobre las enfermedades de la Grecia clásica. Y así divide el volumen en cuatro partes, correspondientes al escalonamiento de toda inquisición histórica: *prophasis* (primeras manifestaciones de la pandemia), *crisis* (progreso en la identificación de la naturaleza de la misma), *arché* (raíces del mal) y *aitía* (causas biológicas y sociales del sida).

Los primeros casos del síndrome, en un principio asociado a otras enfermedades familiares (pneumonías, candidiasis, citomegalovirus, sarcoma de Kaposi, virus de Epstein-Barr y varios virus de origen animal), se detectan entre los homosexuales de California y Nueva York, pero no tarda en propagarse por Europa. El seguimiento de los pacientes va descubriendo su paulatina extensión entre drogadictos y hemofílicos, los grupos de riesgo, para acabar convirtiéndose en un peligro para todos, heterosexuales y niños.

El camino hacia la identificación del agente causante del síndrome está empedrado con los hitos de la virología contemporánea. Antes del primer tercio del siglo había quedado clara la naturaleza de las partículas víricas y su capacidad fagocítica de las bacterias; mediada la centuria se distingue entre virus lentos (de acción persistente) y virus latentes (quiescentes o dormidos); más tarde se corrobora la facultad oncogénica de ciertos virus, al tiempo que se descubre la transcripción inversa, en virtud de la cual el ARN vírico podía transcribirse en ADN e insertarse así en el código genético de las células hospedadoras; por último, la existencia de esos virus —retrovirus— en el hombre. Nociones éstas que permiten entender la disputa entre Gallo (y las formas víricas HTLV) y Montagnier (y el LAV) sobre la primacía de la identificación del agente retrovírico, objeto de la segunda parte, que termina en la descripción de las notas inmunopatogénicas y citopatogénicas del virus del sida, pruebas de seropositividad, vías de transmisión y evolución del paciente.

El repaso de las pestilencias, brotes de peste y epidemias a lo largo de la historia del hombre (su extraordinario paralelismo con la aparición de la sífilis) prepara la pregunta sobre la novedad del sida, cuya dimensión epidemiológica se explica por la mezcla de razas, liberalización de las costumbres y el mismo avance de la técnica de transfusión. Entre las causas coadyuvantes ("patocenosis"), considera las entidades nosológicas a las que se asoció en un comienzo, en particular las pneumonías, el sarcoma de Kaposi y las infecciones oportunistas.

Por último hurga las causas biológicas del HIV-1 y HIV-2 en el examen de la hipótesis africana y otras, luego de un rastreo de las técnicas que permiten inferir la relación filogenética entre los retrovirus. Abunda en la justificación sociológica mencionada más arriba y recoge las esperanzas que en 1988 se abrigaban sobre su conjura. La situación desde entonces no ha cambiado mucho, salvo que conocemos mejor el polimorfismo del virus y la consiguiente dificultad en hallar una vacuna. (L. A.)

Apuntes

Entre los últimos avances técnicos que han saltado a la palestra científica, así un refinamiento de la espectroscopía de absorción de rayos X para detectar y caracterizar monocapas de adsorbato en la superficie de un catalizador sólido y un microelectrodo para medir la concentración de óxido nítrico en la célula, vale la pena detenerse en el segundo. En dos artículos recientes de *Investigación y Ciencia* sobre el óxido nítrico (de Moncada el primero y de Snyder el segundo) se justificaba la importancia biológica de ese mensajero molecular que interviene en la muerte de las células tumorales, en la dilatación de los vasos sanguíneos y en la función neurotransmisora. Pero había una pared que impedía avanzar: ¿cómo medir su cuantía siendo radical libre de una semivida de escasos segundos? El muro comienza a desmoronarse gracias a la invención de un microsensor constituido por una porfirina polimérica y un intercambiador catiónico.

La corteza continental aumenta, a lo largo de las eras geológicas, con el vertido de material que arrojan los volcanes en erupción. Pero también se pierde en el proceso de subsidencia de los límites de placas. La tesis que suponía que la corteza quedaba "rebanada" y no se hundía en el manto, se debilitó con el descubrimiento de rocas corticales metamorfoseadas en distintos cinturones. La puntilla pudiera darla el hallazgo de mármol procedente de sedimentos reciclados a altísimas presiones en el interior del manto.

En la Estación Zoológica de Nápoles se está desarrollando una interesante línea de investigación que se propone conocer la capacidad de aprendizaje de los invertebrados. Abundaban los ejemplos de aprendizaje por imitación en el mundo de los mamíferos e incluso de las aves. Pero, ¿y en los invertebrados? De momento se ha comprobado en los pulpos. Mientras se adiestraba a un ejemplar a escoger entre dos objetos y se le recompensaban los aciertos en el más puro estilo pauloviano, se mantenía a otro individuo observando las enseñanzas; cuando al segundo le tocó el turno demostró llevar la lección bien aprendida.

Poco a poco va cobrando perfiles más definidos el "mundo de ARN", que constituiría el punto de arranque de la vida en la Tierra. A comienzos de la década de los ochenta Thomas Cech y Sidney Altman descubrían funciones enzimáticas en el antaño considerado portador pasivo de la información genética. Harry Noller ha demostrado algo más: la formación de los enlaces peptídicos entre aminoácido puede ser catalizada por ARN en los ribosomas.

Pérdida de ozono en la Antártida, residuos nucleares en el Artico. No menos preocupante que el desprecio de los gobiernos socialistas a la conservación de bosques, suelos y embalses en las repúblicas del Este europeo resulta conocer la práctica soviética de verter residuos radiactivos en las aguas someras del Artico, incluidos un reactor completo de un submarino nuclear y barriles de desechos radiactivos de rompehielos nucleares. Por lo que se ha podido saber, se arrojaron a una profundidad de 60 a 300 metros, la franja donde suelen medrar la mayoría de los organismos y cuyas aguas son más turbulentas que las de las cuencas abisales.

En el espectacular desarrollo teórico y experimental de los fullerenos se había conseguido insertar lantano, ytrio y hierro en las celdas de aquellos carbonos, lo que abría la puerta para aislar y estabilizar especies reactivas en condiciones ambientales. Aprovechando ese método se ha avanzado un paso más: obtener datos espectroscópicos de microagregados de hasta tres átomos de escandio en celdas de fullereno, señal de que esa especie química puede aislarse y estabilizarse a temperatura ambiente. La próxima etapa a cubrir: separar, purificar y cristalizar los microagregados atrapados.

Las espinas dendríticas son pequeñas protrusiones que cubren la superficie de muchas neuronas. En número elevado (hasta 200.000 puede haber en una célula de Purkinje), constituyen el destinatario postsináptico principal de la sinapsis excitadora. Cuanto de ellas sabíamos se había obtenido de forma indirecta, porque su tamaño microscópico impedía la medición directa de sus propiedades funcionales. La misión del refinamiento experimental y la simulación por ordenador atribuye ya a esas estructuras la misión de reforzar el calcio inducido en la sinapsis y aislarlo en el interior de cada espina, y lo mismo con otros segundos mensajeros.